

Rony Jacques Zeitoune

**O USO DO ISOLANTE *ROOM TEMPERATURE VULCANIZING*
NA MITIGAÇÃO DO PROBLEMA DE DESLIGAMENTO DE
ENERGIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS DE
POTÊNCIA**

Florianópolis, 2019.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Zeitoune, Rony Jacques

O uso do isolante Room Temperature Vulcanizing na mitigação do problema de desligamento de energia em linhas de transmissão de sistemas de potência / Rony Jacques Zeitoune ; orientador, Renato Lucas Pacheco, 2019.

104 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Linhas de transmissão. 3. Desligamentos. 4. Isoladores. 5. Room Temperature Vulcanizing. I. Pacheco, Renato Lucas . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA

**O USO DO *ISOLANTE ROOM TEMPERATURE VULCANIZING*
NA MITIGAÇÃO DO PROBLEMA DE DESLIGAMENTO DE
ENERGIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS DE
POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
à Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica
Orientador: Prof. Renato Lucas Pacheco,
Dr.

RONY JACQUES ZEITOUNE

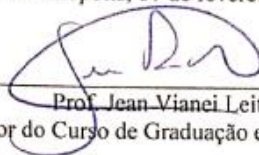
Florianópolis, 2019.

Rony Jacques Zeitouné

**O USO DO ISOLANTE ROOM TEMPERATURE VULCANIZING
NA MITIGAÇÃO DO PROBLEMA DE DESLIGAMENTO DE
ENERGIA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO DE SISTEMAS DE
POTÊNCIA**

Este trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 07 de fevereiro de 2019.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.

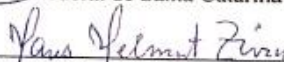
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Hans Helmut Zürn, PhD.

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha amada mãe Cláudia por todo o apoio durante a elaboração deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pois sem ele nada seria possível.

Agradeço principalmente ao meu pai José e minha mãe Claudia, que são os responsáveis integrais por todas as minhas conquistas, sempre me incentivando e sempre acreditando no meu sucesso.

À minha irmã Jéssica, pelos anos de amizade e companheirismo.

À minha namorada Ana, por sempre ser uma pessoa amorosa, por sempre ter me apoiado nos momentos mais difíceis e por nunca ter me deixado desistir.

Ao meu orientador Renato Lucas Pacheco, por todo suporte pedagógico ao longo da graduação.

Aos professores Thair Mustafa e Luiz Meyer da FURB, pelo material de pesquisa fornecido.

Aos meus amigos, que me ajudaram durante a graduação.

À sociedade brasileira, que custeou meus estudos.

Rest easy, lad. Things look bleak
now, but calm will follow the
storm as surely as peace will
follow war
(Sir Anduin Lothar, 1994)

RESUMO

Este trabalho aborda o comportamento do isolante RTV (*Room Temperature Vulcanizing*) quando aplicado nos isoladores de vidro e cerâmicos convencionais com o objetivo de diminuir o desligamento de sistemas de potência em virtude da umidade impregnada nesses isoladores. Será feito uma fundamentação teórica sobre sistemas de potência, isoladores, sobre o princípio de funcionamento do RTV e a demonstração de resultados via estudo de caso após a implementação do RTV em uma linha de transmissão entre as subestações de Camaquã (CAM) e Presidente Médici (UPME) no Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: Linhas de transmissão, Desligamentos, Isoladores, Isolante, RTV.

ABSTRACT

This paper approaches the behavior of RTV (Room Temperature Vulcanizing) insulation when applied to conventional glass and ceramic insulators in order to reduce the power system shutdown due to the humidity impregnated in these insulators. It will be made a theoretical basis on power systems, insulators, on the principle of RTV operation and the demonstration of results via a case study after the implementation of RTV in a transmission line between the substations Camaquã (CAM) and Presidente Médici (UPME) in Rio Grande do Sul.

Keywords: Transmission lines, Shutdowns, Insulators, Insulating RTV.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Composição do sistema elétrico de potência no Brasil..... | 31 |
| Figura 2 - Croqui esquemático dos componentes de uma linha de transmissão..... | 34 |
| Figura 3 - Tipos de estruturas mais usuais em linhas de transmissão. A: Estrutura treliçada autoportante para circuito duplo. B: Estrutura treliçada auto-portante para circuito simples. C: Estrutura treliçada estaiada para circuito simples..... | 35 |
| Figura 4 - Modelo de isolador..... | 52 |
| Figura 5 - Método de produção de polímeros por vulcanização..... | 53 |
| Figura 6 – Exemplo de modelo estrutural polimérico..... | 53 |
| Figura 7 - Supressão da corrente de fuga em um isolador revestido em uma câmara de sal-nevoeiro..... | 63 |
| Figura 8 - O efeito da concentração de enchimento de ATH (em partes por cem da fórmula por peso) na proteção contra corrente de fuga conforme determinado em uma câmara de sal-nevoeiro..... | 64 |
| Figura 9 - Tempo de falha (<i>time of failure</i>) em uma câmara de sal-nevoeiro em função da concentração de preenchimento ATH e para uma distribuição de tamanho particular de enchimento..... | 64 |
| Figura 10 - Aplicação de pulverização do revestimento RTV com ar convencional, usando uma pistola de alto volume e baixa pressão..... | 70 |
| Figura 11 - Aplicação com pulverização sem ar de revestimento RTV para isoladores de chave de 138 kV usando uma vara quente..... | 71 |
| Figura 12 - Localização geográfica da linha de transmissão entre subestações CAM e UPME no sul do Brasil..... | 77 |
| Figura 13 - Distribuição do índice mensal de chuvas durante o inverno no estado do Rio Grande do Sul..... | 79 |
| Figura 14 - A distribuição sazonal de umidade relativa do ar durante o inverno..... | 80 |
| Figura 15 - Velocidade média do vento durante o inverno, ao longo do estado do Rio Grande do Sul..... | 81 |
| Figura 16 - Correlação entre o índice pluviométrico e o número de eventos..... | 83 |
| Figura 17 - Correlação entre a umidade relativa do ar e o número de eventos..... | 84 |
| Figura 18 - Correlação entre a velocidade do vento e o número de eventos..... | 84 |
| Figura 19 - Corda de isoladores com RTV..... | 90 |
| Figura 20 - Isolador com RTV no topo da corda..... | 91 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 - Número total dos desarmes de proteção (2012 e 2016) ao longo do dia..... | 93 |
| Figura 22 - Número total dos desarmes de Proteção (2012 e 2016) ao longo do dia..... | 94 |
| Figura 23 - Número total de desarmes de proteção em 2014 ao longo de 50 km da subestação UPME. | 95 |
| Figura 24 - Número total de desarmes de proteção em 2015 ao longo de 50 km da subestação UPME. | 95 |
| Figura 25 - Número total de desarmes de proteção em 2016 ao longo de 50 km da subestação UPME. | 96 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Porcentagem dos desligamentos por componente na LT. | 39 |
| Tabela 2 - Ano de introdução de alguns polímeros no mercado. | 50 |
| Tabela 3 - Distribuição percentual dos diferentes tipos de isoladores instalados. | 55 |
| Tabela 4 - Parâmetros elétricos da LT. | 77 |
| Tabela 5 - Comparação dos números de desarmes da proteção sob boas condições climáticas comparado ao número total de desarmes. | 82 |
| Tabela 6 - Fatores de correlação dos eventos de desarmes de proteção. | 85 |
| Tabela 7 - Número de desarmes da proteção entre 2012 e 2016. | 92 |

SÍMBOLOS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

| | |
|--------------|---|
| <i>ABNT</i> | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| <i>ACF</i> | Fator de Correção Atmosférica |
| <i>ATH</i> | Trihidrato de Alumina |
| <i>CA</i> | Corrente Alternada |
| <i>CC</i> | Corrente Contínua |
| <i>CD</i> | Circuito Duplo |
| <i>CS</i> | Circuito Simples |
| <i>CAM</i> | Camaquã |
| <i>CEEE</i> | Companhia Estadual de Energia Elétrica |
| <i>EPDM</i> | Etileno-Propileno-Dieno |
| <i>FTIR</i> | Infravermelho por Transformada de Fourier |
| <i>INMET</i> | Instituto Nacional de Meteorologia |
| <i>LT</i> | Linha de transmissão |
| <i>NBR</i> | Norma Brasileira |
| <i>ONS</i> | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| <i>PDMS</i> | Polidimetilsiloxano |
| <i>RTV</i> | Room Temperature Vulcanizing |
| <i>SE</i> | Subestação |
| <i>SIN</i> | Sistema Interligado Nacional |
| <i>UPME</i> | Presidente Médici |
| <i>WMO</i> | World Meteorological Organization |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 Introdução Geral | 27 |
| 1.1 Objetivos | 29 |
| 2 Fundamentação Teórica..... | 31 |
| 2.1 Características de um sistemas de transmissão de energia elétrica e o Sistema Interligado Nacional..... | 31 |
| 2.2 As principais características e composição das linhas de transmissão de energia elétrica no Brasil | 32 |
| 2.3 Perturbações no Sistema Interligado Nacional associadas a desligamentos de linhas de transmissão | 36 |
| 3 Isoladores..... | 39 |
| 3.1 Condução de eletricidade em sólidos | 39 |
| 3.2 Isoladores Vítreos..... | 41 |
| 3.2.1 O vidro | 41 |
| 3.2.2 Estrutura vítrea – propriedades dos vidros | 42 |
| 3.2.3 Isoladores – fabricação de isoladores..... | 42 |
| 3.2.4 Isoladores de suspensão | 43 |
| 3.2.5 Isoladores em regime de trabalho – reatividade dos vidros .. | 43 |
| 3.2.6 Considerações finais | 43 |
| 3.3 Isoladores Cerâmicos..... | 44 |
| 3.3.1 Histórico..... | 44 |
| 3.3.2 Teoria básica | 46 |
| 3.3.3 Aplicações, vantagens e desvantagens..... | 47 |
| 3.3.4 Problemas ambientais e avanços | 48 |
| 3.3.5 Conclusão..... | 48 |
| 3.4 Isoladores Poliméricos..... | 49 |
| 3.4.1 Teoria básica | 49 |
| 3.4.2 Produção de isoladores poliméricos | 51 |
| 3.4.3 Vantagens entre os tipos de isoladores..... | 54 |

| | |
|--|----|
| 3.4.4 Conclusão | 55 |
| 3.5 Panorama dos isoladores no sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro | 55 |
| 4 O isolante <i>Room Temperature Vulcanizing</i> | 57 |
| 4.1 Introdução | 57 |
| 4.2 Modificação do desenho de isoladores | 57 |
| 4.3 Isoladores não cerâmicos | 58 |
| 4.4 Limpeza de isolador | 58 |
| 4.5 Graxa | 59 |
| 4.6 Revestimentos | 60 |
| 4.7 Composição dos revestimentos da borracha de silicone RTV ... | 60 |
| 4.8 Características importantes dos revestimentos do RTV | 61 |
| 4.8.1 Supressão da corrente de fuga | 62 |
| 4.8.2 Adesão aos isoladores | 65 |
| 4.8.3 Cor do revestimento | 66 |
| 4.8.4 Controle de queda e fluxo | 66 |
| 4.8.5 Construção de película | 66 |
| 4.8.6 Espessura do revestimento | 67 |
| 4.9 Aplicação do revestimento | 68 |
| 4.9.1 Preparando o isolador | 68 |
| 4.9.2 Preparando o material | 69 |
| 4.9.3 Tipo de equipamento | 69 |
| 4.9.4 Aplicação energizada | 71 |
| 4.10 Expectativa de vida | 72 |
| 4.10.1 Efeito Corona | 72 |
| 4.10.2 Reversão | 73 |
| 4.10.3 Reaplicação | 74 |
| 5 Estudo de caso | 75 |
| 5.1 Introdução | 75 |

| | |
|--|----|
| 5.2 Condições meteorológicas | 78 |
| 5.2.1 Índice pluviométrico | 78 |
| 5.2.2 Umidade relativa do ar | 79 |
| 5.2.3 Velocidade do vento..... | 80 |
| 5.3 Estudo da correlação entre parâmetros das faltas e condições meteorológicas..... | 81 |
| 5.4 Análise dos resultados | 86 |
| 5.5 Próximos passos | 87 |
| 5.6 Ações sugeridas para mitigar a falta de energia da linha..... | 87 |
| 5.7 Análise dos resultados pós aplicação do RTV..... | 91 |
| 6 Conclusão | 97 |
| Referências bibliográficas | 99 |

Capítulo 1

INTRODUÇÃO GERAL

Desenvolver fontes de energia para realizar um trabalho com resultados é primordial para o progresso industrial, que é fundamental para o aperfeiçoamento contínuo do padrão de vida da população global. Descobrir outras fontes de energia disponíveis onde é necessário, transformar a energia de uma forma para outra e usá-la sem criar sujeira que destruirá nossa biosfera são, entre outros, os maiores desafios encarados no mundo hoje. O sistema elétrico de potência é uma das ferramentas para gerar, transformar e transportar energia e é ele que está executando um importante papel para superar esse desafio. Engenheiros são necessários para desenvolver e implantar os avanços da ciência, para solucionar os problemas de energia elétrica e para garantir um grau alto de confiabilidade dos sistemas, juntamente com o máximo cuidado na proteção da nossa ecologia (STEVENSON, 1976).

De acordo com Stevenson (1976), um sistema de potência consiste em três componentes fundamentais: as centrais geradoras, as linhas de transmissão e os sistemas de distribuição. As linhas de transmissão compõem o meio de associação entre as centrais geradoras e os sistemas de distribuição e direcionam a energia a outros sistemas de potência através de interconexões.

O atual aspecto do sistema brasileiro de atendimento da demanda de energia elétrica é definido por grandes empreendimentos de geração elétrica que, em sua maior parte, se encontram afastados dos grandes polos consumidores, essencialmente em territórios urbanos e áreas industriais. Desta forma, o sistema é consideravelmente dependente do fluxo da eletricidade produzida nas usinas e, devido à enorme extensão territorial do Brasil, necessita seguir grandes distâncias por meio de instalações que fazem parte do Sistema Interligado Nacional (SIN), que são principalmente as Linhas de Transmissão (LTs) e as Subestações (SEs). A energia é transportada pelo país através das LTs do SIN, que atendem a 98,3% do consumo de eletricidade brasileiro (BARRETO, 2016).

Ainda de acordo com Barreto (2016), nesse cenário, é fundamental falar sobre a considerável ocorrência de perdas elétricas a

que tal sistema está imposto, já que tais perdas se intensificam quanto maior é a distância de uma interligação elétrica. Complementarmente, em um sistema de transmissão onde a eletricidade segue grandes distâncias, há maior condição à ocorrência de episódios indesejáveis que possam prejudicar a transmissão dessa energia, precisando o sistema, assim, possuir mecanismos de redução de riscos, por exemplo, soluções tecnológicas e usos de substâncias que podem e devem ser utilizadas como, por exemplo, a aplicação de substâncias nos isoladores elétricos que assegurem a confiabilidade do fornecimento constante de eletricidade.

Em muitas partes do mundo, a contaminação de isoladores tornou-se um enorme entrave ao fornecimento constante de energia elétrica. Em isoladores de vidro e porcelana, os quais são empregados em todo o mundo, condições atmosféricas úmidas dão origem a películas formadas de água e, na existência de contaminantes, uma corrente de fuga descontrolada se desenvolve e resulta no desligamento da linha de transmissão, interrompendo, desta forma, a transmissão de eletricidade (CHERNEY,1995).

Estes desligamentos têm o potencial de provocar prejuízos para indústrias, consumidores livres, empresas transmissoras, concessionárias de distribuição e outros, gerando impactos negativos na economia do país, porém esse trabalho não possuirá foco em apresentar dados financeiros que comprovem esses prejuízos.

Para que tal fornecimento elétrico ocorra de forma otimizada, faz-se necessário que o sistema de transmissão seja planejado considerando não somente os aspectos de transporte de eletricidade, mas também de confiabilidade e eficácia.

Sendo parte importante das linhas de transmissão, os isoladores evitam a dissipação da energia através da estrutura, garantindo a uniformização do campo elétrico, reduzindo o efeito corona. Porém, se o isolante for contaminado por acúmulo de pó ou líquidos de tipos diversos, ele pode ter insucesso na sua função.

O *Room Temperature Vulcanizing* (RTV) é um material polimérico formado de borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente. Esse material é relativamente novo no mercado, com seu uso comercial em larga escala datado do final dos anos 80, mas já se mostra uma possibilidade real de uso na mitigação dos desligamentos em LTs de sistemas de potência.

Considerando a elevada incidência de eventos indesejáveis na transmissão e a magnitude de seus efeitos negativos e devido à ausência de trabalhos que direcionem informações acerca da vulnerabilidade de

LTs para um contexto de planejamento, destaca-se a importância do tema em estudo e do presente trabalho. Diante do exposto, optou-se por desenvolver um trabalho a respeito da vulnerabilidade associada ao desligamento de LTs em virtude de umidade e contaminantes nos seus isoladores.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivo principal apresentar o isolante RTV e mostrar a eficácia de sua aplicação nos isoladores da linha de transmissão entre as subestações de Camaquã (CAM) e Presidente Médici (UPME) no Rio Grande do Sul, corroborando com a ideia de que, com o uso deste isolante, tem-se uma diminuição considerável do número de desligamentos não-intencionais desta linha de transmissão.

Se propõe a apresentar revisão bibliográfica sobre os temas que são mais relevantes para o entendimento do trabalho. Assim, é feito um panorama geral sobre as características das interligações elétricas compostas por LTs, sendo feita uma breve exposição sobre o sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro.

Também, se objetiva apresentar a fundamentação em relação aos isoladores elétricos utilizados, sendo apresentados inicialmente as bases conceituais e tipos disponíveis, incluindo estudos sobre as propriedades físico-químicas do isolante RTV.

Por fim, trazer as conclusões levantadas a partir da avaliação dos resultados obtidos e recomendações que este trabalho almeja efetivar. Na discussão sobre os resultados obtidos, são propostas formas de abordagem financeiras e ambientais em relação à aplicabilidade em grande escala do isolante, de forma que tais sinalizações podem servir como motivações para trabalhos futuros.

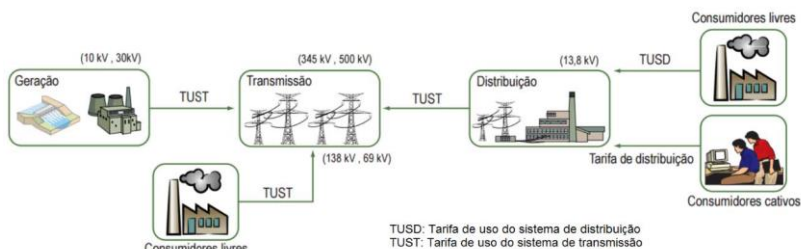
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo aborda uma revisão bibliográfica sobre os assuntos necessários para o entendimento do trabalho. Serão tratados assuntos relativos a conceitos básicos do sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro.

2.1 Características de um sistemas de transmissão de energia elétrica e o Sistema Interligado Nacional

Um sistema de transmissão de energia elétrica, de acordo com a Norma Brasileira (NBR) 5.460 (ABNT, 1992), faz parte de um sistema elétrico de potência, sendo este último definido de seguinte maneira: “Em sentido amplo, é o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica”. Empreendimentos responsáveis pelo transporte da energia elétrica (LTs e SEs, além de equipamentos de proteção e controle) formam o sistema de transmissão de energia elétrica e possuem interface com empreendimentos de distribuição e de geração de eletricidade (Figura 1).

Figura 1 - Composição do sistema elétrico de potência no Brasil.



Fonte: Aneel (2008)

A Figura 1 configura o esquema do sistema elétrico de potência no Brasil, onde a geração de energia usa do sistema de transmissão para encaminhar a eletricidade produzida para a rede de distribuição. Além disso, os consumidores livres também podem utilizar o sistema de transmissão para obter energia em tensões acima das direcionadas aos consumidores cativos, ou então usar o sistema de distribuição para conseguir eletricidade de menor tensão. A Figura 1 ainda apresenta a distribuição por parte dos consumidores livres e cativos e dos agentes de geração, distribuição e transmissão (BARRETO, 2016).

De acordo com Itaipu (2015), conforme citado por Barreto (2016, p.10), atualmente, as LTs conduzem a eletricidade em Corrente Alternada (CA) ou Corrente Contínua (CC). A diferença em torno de ambas é o sentido da corrente: enquanto que na CC os elétrons se deslocam em um único sentido, na CA eles trocam de direção constantemente, de acordo com a frequência da rede elétrica. Atualmente no Brasil, o sistema de transmissão se utiliza na maior parte de tecnologias em CA. Porém, cabe salientar que existem diversos empreendimentos, previstos para operarem em CC, em processo de construção no mundo e que, no Brasil, as LTs com tal tipo de tecnologia estão vigentes desde 1984, quando se iniciou a operação de um sistema de transmissão constituído por duas linhas interligando as SEs de Foz do Iguaçu (PR) e Ibiúna (SP).

As LTs do SIN são usadas para transportar a eletricidade provida por unidades geradoras para os polos consumidores, pois a energia elétrica possui limitações para seu armazenamento em larga proporção, que são vinculadas a custo e tecnologia (BARRETO, 2016). Segundo ONS (2016), a energia é conduzida pelo Brasil por empresas de transmissão, que eram responsáveis por operar mais de 125 mil quilômetros de LTs em 2014 (apud BARRETO, 2016, p. 25).

2.2 As principais características e composição das linhas de transmissão de energia elétrica no Brasil

As principais características e a composição das linhas de transmissão de energia elétrica no país, conforme Eletrobrás (2015), citado por Barreto (2016, p. 20), são definidas da seguinte maneira: uma LT é constituída por um conjunto de cabos condutores, equipamentos isoladores e acessórios, existindo possibilidade de serem aéreas, quando os condutores são mantidos pendurados por meio de isoladores e suportes apropriados ligados a torres ou postes, ou subterrâneas, quando os

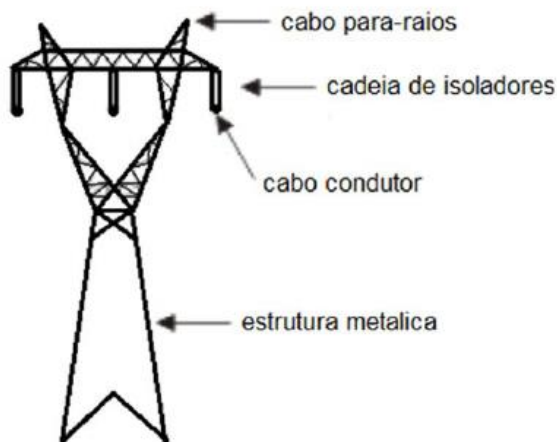
condutores, isolados, são instalados abaixo do nível do solo. As LTs podem ainda ser subaquáticas, quando estabelecidas sob o leito de rios ou do mar, por meio de características construtivas distintas.

Entre as LTs que existem, aquelas construídas no subsolo ou de forma subaquática refletem uma parcela muito baixa em relação às LTs aéreas, já que sua procura ocorre apenas em situações específicas e seu custo é consideravelmente mais alto. Porém, as LTs subaquáticas ou subterrâneas podem proporcionar soluções técnicas imprescindíveis em alguns casos, além de benefícios para a confiabilidade do sistema de transmissão já que, quando os cabos ficam isolados no subsolo, geralmente há um risco mais baixo de ocorrência de efeitos danosos que possam causar a interrupção da transmissão (BARRETO, 2016). Por não representarem parcela significativa dos empreendimentos do sistema de transmissão brasileiro e não possuírem vulnerabilidade significativa em relação às correntes de fuga, as LTs subterrâneas e subaquáticas não serão examinadas no presente trabalho.

Condições básicas para o projeto de LTs aéreas com tensão de 38 a 800 kV são determinadas pela NBR 5.422 (ABNT, 1985), de modo a garantir níveis mínimos de segurança e restringir perturbações em instalações próximas. Ainda de acordo com a ABNT (1985), são previstas em seu conteúdo e nas suas referências as normas que as concessionárias de serviços públicos de energia elétrica, as empresas de projetos e os produtores de equipamentos associados a tais empreendimentos obrigatoriamente têm que atender.

As LTs aéreas são essencialmente compostas por estruturas metálicas que mantêm os cabos condutores, também metálicos, pendurados (Figura 2). Sendo os sistemas de potência trifásicos, normalmente os sistemas de transmissão de corrente alternada possuem três conjuntos de cabos, os quais formam um circuito, que são acompanhados por um cabo para-raios, que é colocado no topo da estrutura. (ABRADEE, 2014).

Figura 2 - Croqui esquemático dos componentes de uma linha de transmissão.



Fonte: Barreto(2016)

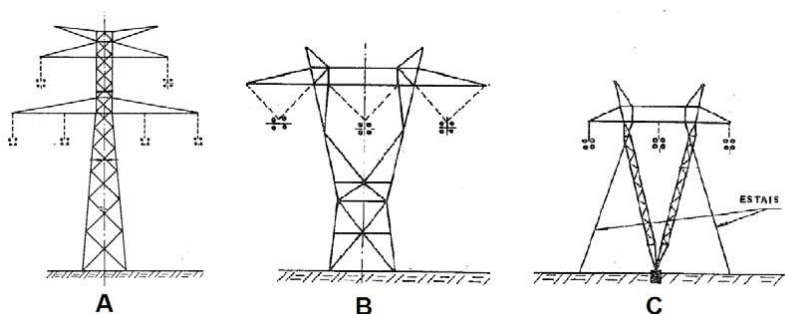
As partes mais relevantes de uma LT de Circuito Simples (CS) e tipologia de estrutura denominada como autoportante são representadas na Figura 2. É importante destacar que existem LTs aéreas compostas por mais de um circuito, havendo muitas LTs em território brasileiro que contém torres que são usadas por dois circuitos, sendo denominadas de LTs de Circuito Duplo (CD) (BARRETO, 2016).

Os elementos ativos das LTs são compostos por cabos condutores, que se encontram de forma pendurada, sem isolamento. Fazer uma escolha de forma apropriada é de importância essencial para o bom funcionamento da linha e configura importantes consequências de natureza financeira. Para os condutores de LTs aéreas os atributos procurados são: custo reduzido; boa resistência mecânica; alta condutibilidade elétrica; peso específico reduzido; e alta resistência à oxidação e à corrosão por agentes químicos poluentes (FUCHS, 1977). Existem vários tipos de cabos condutores, mas os condutores de alumínio com aço em seu interior geralmente são os mais utilizados por motivos

financeiros, com exceção nas zonas litorâneas, onde há forte oxidação.

As estruturas simbolizam o elemento suporte de uma LT e têm por objetivo sustentar os cabos condutores de energia, bem como os outros itens. De acordo com as normas de segurança definidas, os cabos condutores e os cabos para-raios devem permanecer separados do solo e entre si (BARRETO, 2016). De acordo com Fuchs (1977), os tamanhos e modelos das estruturas consistem de diferentes aspectos, destacando-se: tamanhos e modelos do isolamento; disposição dos condutores e distância entre os mesmos; altura de segurança; função mecânica; distância mínima entre os condutores e o solo; materiais estruturais; forma de resistência; número de circuitos; entre outros. Dessa forma, vários tipos de estruturas são empregadas, tendo ênfase as linhas da rede básica de característica construtiva treliçada auto-portante e treliçada estaiada (Figura 3).

Figura 3 - Tipos de estruturas mais usuais em linhas de transmissão. A: Estrutura treliçada autoportante para circuito duplo. B: Estrutura treliçada autoportante para circuito simples. C: Estrutura treliçada estaiada para circuito simples.



Fonte: Barreto (2016)

Como pode ser visto na Figura 3, vários modelos de estruturas podem ser usados, sendo que uma só interligação entre SEs normalmente tem uma constituição de torres com modelos diversos de estruturas (BARRETO, 2016).

Os isoladores possibilitam que os cabos condutores permaneçam isolados eletricamente das estruturas e, ao mesmo tempo, sejam sustentados por estas. Devem suportar as requisições mecânicas ou aquelas de natureza elétrica como, por exemplo, sobretensões de origem atmosférica, cujas intensidades podem ser muito altas e distintas.

Normalmente se utiliza vidro temperado ou porcelana vitrificada para sua confecção. Podem ser utilizados três tipos de classificação: isoladores de pino; isoladores tipo pilar e isoladores de suspensão (FUCHS, 1977).

De acordo com Fuchs (1977), além desses itens, as LTs são compostas de acessórios e ferragens, por exemplo, sistemas de aterramento, cadeias de suspensão, cadeias de ancoragem e cabos para-raios. Na parte superior dos isoladores deve haver um objeto de conexão à estrutura (normalmente um gancho ou uma manilha) e na parte inferior outro objeto que o firma ao cabo condutor (pinça ou grampo de suspensão), que são as cadeias de suspensão. Uma ou mais colunas de isoladores compõem as cadeias de ancoragem, que necessitarão aguentar as forças atribuídas às cadeias de suspensão e, também, as forças devidas ao puxamento dos cabos.

2.3 Perturbações no Sistema Interligado Nacional associadas a desligamentos de linhas de transmissão

Segundo Barreto (2016), as LTs são empreendimentos lineares que percorrem áreas amplas, diferente das SEs, que tem localização específica. Os desligamentos que acontecem na malha de linhas de transmissão retratam parcela considerável das perturbações que surgem no SIN.

Conforme mencionado pelo TCU (2013, apud BARRETO, 2016, p. 41), as perturbações ocorrem no SIN e são definidas pelo desligamento forçado de um ou mais de seus componentes. Para Goya (2010), o desligamento é o ato de abertura de um ou mais dispositivos que conectam circuitos de potência, sendo que a interrupção da continuidade elétrica acontece por meio de um componente.

Os desligamentos podem ser forçados ou programados. Segundo o item 133 do Submódulo 20.1 do documento “Procedimentos de Rede” (ONS, 2015), que apresenta um glossário de termos técnicos, o desligamento forçado é definido por:

Desligamento de um componente de serviço, em condições não programadas, geralmente resultante da ocorrência de uma condição de emergência que imponha o desligamento manual ou automático do equipamento para evitar risco de morte e/ou de dano a equipamento ou outras consequências indesejadas para o sistema elétrico. (ONS, 2015)

O presente trabalho trata do desligamento forçado causado por uma corrente de fuga não planejada, criada em um ambiente úmido em conjunto com contaminantes no isolador da LT.

ISOLADORES

Neste capítulo são abordadas as características gerais de isoladores usados nas LTs. Apesar de representarem uma despesa relativamente baixa comparada com a despesa total de uma linha de transmissão em um sistema de transmissão de energia elétrica, os isoladores elétricos são de importância essencial para assegurar a confiabilidade do sistema (MARAN, 2010). Estudos mostram que cerca de 60% dos desligamentos em linhas de transmissão com tensão maior que 230 kV acontecem devido a falhas com isoladores elétricos (GARCIA e SANTOS FILHO, 2003a). Dados mais exatos são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 - Porcentagem dos desligamentos por componente na LT.

| Componente | Desligamentos (%) | |
|------------------|-------------------|----------|
| | < 230 kV | ≥ 230 kV |
| Isoladores | 46,4 | 63,2 |
| Cabos Condutores | 19,6 | 9,7 |
| Cabos para-raios | 3,6 | 7,4 |
| Estruturas | 16,3 | 10,1 |
| Ferragens | 0,8 | 1,8 |
| Outras Causas | 13,2 | 7,8 |

Fonte: Adaptado de Garcia e Santos Filho (2003b)

3.1 Condução de eletricidade em sólidos

Para compreender melhor os problemas que ocorrem com os isoladores elétricos, deve-se estudar o sistema condução nos sólidos não cristalinos. Estes materiais, quando sujeitos a um campo elétrico, demonstram uma polarização por causa do movimento dos seus íons (MARAN, 2010).

De acordo com Maran (2010), existem três tipos fundamentais de polarização:

a) Polarização eletrônica e iônica

Acontece de um modo praticamente imediato sob a ação de um campo elétrico e sem dispersão de energia.

A polarização eletrônica se reduz com o crescimento da temperatura, devido à dilatação do dielétrico e consequente da redução do número de partículas por unidade de volume.

A polarização iônica é acentuada com o crescimento da temperatura, uma vez que se debilitam as forças elásticas interiônicas quando se elevam as distâncias entre os íons devido à dilatação do corpo.

b) Polarização dipolar

Diferencia-se da eletrônica e da iônica com relação à movimentação térmica das partículas. As moléculas dipolares, que se encontram em movimentação térmica caótica, se guiam de forma parcial pela ação do campo, o qual é a causa da polarização.

c) Polarização estrutural

Surge apenas em corpos amorfos e em sólidos não cristalinos polares, como por exemplo, o vidro, onde um corpo é composto de forma parcial de partículas de íons. Vem a ser a orientação de estruturas complexas de material, diante da ação de um campo externo, surgindo devido ao deslocamento de íons e dipolos, na presença de aquecimento devido a perdas Joule. Quanto à dependência com a temperatura, tem comportamento equivalente à polarização dipolar. (TRAVERSA, 2009).

Em relação aos isolantes sólidos de muito alta resistividade, a resistência através de sua massa é também elevada, sendo muito baixa a corrente que os percorre. Pelo acúmulo de poeira e umidade na superfície das peças isoladoras, é formado um novo caminho para passagem da corrente elétrica, o qual se diz ser resistência superficial (MARAN, 2010).

Para poder expressar numericamente a capacidade de um dado material isolante aguentar tensões significativas, se estabelece uma grandeza a que se dá o nome de rigidez dielétrica e que é determinada como sendo o máximo valor do campo elétrico para o qual se dá a ruptura do isolante (HALLIDAY, 2006). No caso de isolantes sólidos, de acordo com Maran (2010), pode ocorrer de o arco disruptivo, ao invés de atravessar a sua massa, salte pela superfície.

Segundo Halliday (2006), o quociente da tensão pela distância entre os condutores recebe o nome de rigidez dielétrica superficial. Nos

dielétricos submetidos a uma tensão contínua, observa-se uma perda por efeito Joule, tal como nos condutores. A corrente de perdas, relativamente muito pequena, dá lugar a certo aquecimento. Tais perdas não têm importância, a não ser quando proporcionam um aquecimento, possibilitando, por consequência, maior corrente e maiores perdas.

De acordo com Maran (2010), tal efeito é um dos motivos fundamentais de falhas em isoladores elétricos em áreas com indicadores de poluição atmosférica alta. Ele também é denominado de efeito de avalanche térmica. Em consequência do grande campo elétrico existente, uma corrente começa a circular pelo entorno do isolador, causando o aquecimento deste, reduzindo a resistividade e, por consequência, elevando a corrente, até o ponto em que ocorre a falha no dielétrico. Constata-se, também, que materiais iônicos, neste caso os vidros, tem uma condutividade que depende bastante da temperatura.

3.2 Isoladores Vítreos

Isoladores vítreos são largamente usados em linhas de transmissão, principalmente em linhas de alta e extra alta tensão, onde compõem 70 % dos isoladores empregados devido à sua relativa confiabilidade e facilidades de manutenção (GARCIA e SANTOS FILHO, 2003b).

Desse modo, segundo Maran (2010), é importante saber sobre os fundamentos desse tipo de isolador. Analisar as suas características mais relevantes, modelos, suas vantagens e desvantagens pode colaborar para uma melhor entendimento dos elementos de uma linha de transmissão, tendo em vista que esse é um assunto de alta relevância dentro da engenharia elétrica.

3.2.1 O vidro

Materiais sólidos não cristalinos são de uso habitual na sociedade. Desde fontes naturais, como o vidro obsidiano, usado em acessórios elementares no início da história humana, até fibras ópticas utilizadas para o transporte de informação. Hoje o em dia o vidro continua sendo um setor de progresso e descobrimento, aperfeiçoando o conhecimento sobre sua estrutura atômica e, por consequência, permitindo moldá-lo de maneira conveniente à nossa necessidade (VEDISHCHEVA e WRIGHT, 2009).

3.2.2 Estrutura vítrea – propriedades dos vidros

Em sua maior parte, os vidros tem propriedades físicas parecidas, tais como: dilatação térmica muito baixa, viscosidade alta, alta durabilidade, baixa condutividade elétrica e ótima resistência à água, líquidos salgados, substâncias orgânicas, álcalis e ácidos, com ressalva ao ácido fluorídrico e ao fosfórico. Menciona-se também algumas propriedades mecânicas essenciais nos vidros: tem elasticidade ideal, podendo aguentar grandes cargas quando a sua superfície não possui falhas ou riscos; comportam mais pressão do que tração e uma maior dureza pode ser alcançada por meio de um tratamento térmico, intitulado têmpera (MARAN, 2010).

3.2.3 Isoladores – fabricação de isoladores

Isoladores de vidro são produzidos em sua maior parte de vidro soda-lime-sílica. São vidros que tem como reagentes básicos a sílica (SiO_4), o óxido de sódio (Na_2O) e o óxido de cálcio (CaO). São os vidros mais comuns que existem e de menor preço de fabricação. São empregados em garrafas e vidros para janelas. Tem ponto de fusão de aproximadamente 1200°C e apresentam boa transparência e trabalhabilidade.

Diversas indústrias de isoladores elétricos existem no mundo, dentre as mais notáveis podem-se mencionar: Saint-Gobain e Electrovidro. São produzidos isoladores de vidros para uso de média (1 kV a 69 kV), alta (69 kV a 500 kV) e extra alta tensão (maior e inclusive 500 kV), para linhas de corrente contínua e corrente alternada e em diversos modelos.

Com o objetivo de aumentar a dureza do vidro, este passa por um processo de têmpera, que compreende essencialmente em, após a solidificação do vidro, expô-lo à um choque térmico, fazendo-o resfriar rapidamente, causando a solidificação da parte externa muito rapidamente, deixando-a sob compressão, com seu interior sob tração (MARAN, 2010).

3.2.4 Isoladores de suspensão

Os isoladores de suspensão demonstram-se um dos modelos mais versáteis para utilização em linhas de transmissão e distribuição. Constituindo cadeias, eles podem ser usados em uma tensão qualquer, estando dependente apenas do número de isoladores em série. Além das variedades de tipos e classes mecânicas que existem, é possível fazer a montagem de duas ou mais cadeias em paralelo, para esforços mecânicos particularmente altos, grandes vãos ou cabos muito pesados. Existem também tipos específicos para lugares sujeitos a poluição muito severa. Estes isoladores tem uma alta durabilidade, mas podem ter sua vida útil diminuída em função das condições de trabalho. Esforços mecânicos e elétricos, mesmo por um período pequeno, em valores acima dos indicados pelo fabricante podem causar danos irreparáveis (SANTANA, 2009).

3.2.5 Isoladores em regime de trabalho – reatividade dos vidros

De acordo com Maran (2010), os vidros são empregados largamente pela indústria devido à sua alta durabilidade. Isso significa intrinsecamente que os vidros tem uma baixa reatividade quando em contato com a maior parte dos ácidos e bases conhecidas. Até mesmo o ácido sulfúrico, reconhecido como um agente altamente reativo, é aplicado, por vezes, para proporcionar uma maior resistência para o vidro.

Existem vários tipos de ataque ao vidro, em especial o ataque propiciado por intemperismo, reagindo essencialmente com o gás carbônico. Ele age contra o vidro da mesma forma que os ácidos, acarretando em manchas negras na superfície do isolador. (MAIA, 2003).

3.2.6 Considerações finais

Os isoladores vítreos são os mais empregados em linhas de transmissão de alta tensão no Brasil vindo, dessa forma, a ser um importante objeto de estudo, principalmente devido à sua influência no sistema. Porém, a rápida evolução dos isoladores poliméricos vem colocando em risco a sua sobrevivência, em longo prazo, no mercado de transmissão de energia elétrica.

No entanto, sua confiabilidade, praticidade de manutenção e rusticidade, somado ao fato das linhas de transmissão antigas não estarem aptas para receber esses novos isoladores, provavelmente assegurarão um longo histórico de utilização. Aprimoramento nas características dos isoladores de vidro podem possibilitar seu uso, diminuindo o custo de produção e peso e aumentando sua eficiência como isolador elétrico (MARAN, 2010).

3.3 Isoladores Cerâmicos

Falando exclusivamente sobre isoladores cerâmicos, eles se ressaltam por possuírem alta resistência mecânica, não serem porosos e terem alta capacidade de isolação. Um importante exemplo de material cerâmico que é frequentemente empregado é a porcelana. Ainda que os diferentes materiais tenham características e utilizações distintas entre si, todos eles devem apresentar a confiabilidade dos sistemas elétricos (ROSA JUNIOR, 2010).

3.3.1 Histórico

De acordo com Unicamp (2009, apud ROSA JUNIOR, 2010, p. 1), os isoladores primários surgiram nos sistemas elétricos de linhas de telégrafos. Em relação aos isoladores cerâmicos, uma das primeiras empresas que os fabricaram estava no Reino Unido, com Stiff Doulton. Depois, perto do ano de 1840, com Joseph Bourn e, em 1868, com Bullers. Louis A. Cauvet, em 1865, conseguiu a patente por fabricar isoladores com o orifício rosqueado. Posteriormente, com a criação de suspensão para isoladores, tornou-se realizável a transmissão de alta tensão.

Nascido no Brasil em 11 de maio de 1852, sendo contemporâneo do segundo imperador brasileiro, Guilherme Schuch, formado em engenharia na escola politécnica de Viena, criou uma repartição denominada Telégrafo Nacional. Desse modo, foi responsável por instalar os primeiros fios telegráficos no país. Porém, devido ao clima úmido e quente nos trópicos, os isoladores rapidamente se deterioraram. Por esse motivo, o barão de Capanema, título recebido por Guilherme Schuch, criou um novo tipo de isolador para linhas telegráficas terrestres.

Esse isolador era essencialmente composto todo de vidro,

porcelana, ebonite, entre outros materiais. Entretanto, o seu diferencial é que tal isolador não possuía peça metálica. Capanema recebeu em seu nome a patente e o invento foi difundido por toda a Europa. Capanema foi um dos engenheiros mais importantes da época no Brasil.

De acordo com Carter e Norton (2007), as cerâmicas são normalmente divididas em dois grupos principais:

a) Cerâmica Tradicional - Abrange cerâmica de revestimentos, como ladrilhos, azulejos e também potes, vasos, tijolos e outros objetos que não tem requisitos tão altos, se comparados ao próximo grupo.

b) Cerâmica Avançada, ou de engenharia - Normalmente são materiais com requisitos maiores e conseguidos a partir de matéria prima mais pura. Alguns exemplos são substratos para chips de microprocessadores, cordierita como suporte para catalisador automotivo, ferramentas de corte para usinagem, tijolos refratários para fornos.

Os materiais cerâmicos podem ainda, segundo Carter e Norton (2007), ser classificados de outras maneiras, como:

a) Composição química: Óxidos, Carbetos, Nitretos e Oxinitretos.

b) Origem Mineralógica: Quartzo, bauxita, mulita, apatita, zircônia, entre outros.

c) Método de moldagem: Compressão isostática, colagem por barbotina (*slipcasting*), extrusão e moldagem por injeção, calandragem, entre outros.

As mais antigas peças de cerâmica são conhecidas por arqueólogos e foram achadas na Tchecoslováquia, datando de 24.500 a.C. No Japão, na área ocupada pela cultura Jomon, há aproximadamente oito mil anos ou mais, foram encontradas outras importantes peças cerâmicas. Tais peças também foram achadas no Brasil, na região da Floresta Amazônica, com a mesma idade.

A capacidade da argila de ser moldada quando se mistura com água em proporção correta, e de endurecer após a queima, possibilitou que ela fosse designada ao armazenamento de grãos ou líquidos, que evoluíram mais tarde para artigos mais bem elaborados, com bocais e alças, imagens em relevo, ou com pinturas vivas que, possivelmente, começaram a ser vistas como objetos de decoração.

Em outras localidades, como na China e no Egito, a cerâmica tem aproximadamente 5000 anos. Com o tempo, a cerâmica foi evoluindo e cada vez mais fazendo parte da vida dos povos, mas não sem antes passar pelos esforços dos gregos, romanos, chineses, ingleses, italianos, franceses, alemães e norte-americanos.

A esmaltação industrial teve início por volta de 1830, na Europa Central. Depois da Segunda Guerra Mundial, se sucedeu um grande crescimento da produção de revestimento cerâmico, como resultado da elaboração de novas técnicas de produção. Por consequência, os custos começaram a baixar, permitindo a uma faixa maior de classes sociais a condição de obter o produto cerâmico.

Nos dias de hoje, o uso da cerâmica não se limita apenas aos tijolos, revestimentos e tijolos refratários, mas também é utilizada em aplicações aeroespaciais e de tecnologia de ponta, como na blindagem térmica de ônibus espaciais, na produção de nanofilmes, sensores para detectar gases tóxicos, varistores de redes elétricas, entre outros (CARTER E NORTON, 2007).

3.3.2 Teoria básica

Segundo Rosa Junior (2010), geralmente os materiais cerâmicos são ótimos isoladores elétricos e, na maior parte desses materiais, sua resistividade (ρ) é maior que $10^{14} \Omega \cdot m$. Alguns exemplos de matérias primas cerâmicas são:

- a) Óxido de Alumínio (Al_2O_3).
 - b) Mulita ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$).
 - c) Óxido de Berílio (BeO).
 - d) Nitreto de Alumínio (AlN).
 - e) Silicato de Magnésio ($2MgO \cdot SiO_2$).
-

Em um isolante elétrico, a lacuna de energia entre a parte inferior da banda de condução e a parte superior da banda de valência tem que ser grande. Dessa forma, um isolante é assim definido. Essa lacuna é conhecida por *gap* (ROSA JUNIOR, 2010).

É importante destacar, também, que os materiais cerâmicos são bons isoladores de calor. A este grupo pertencem os materiais refratários, que possibilitam a construção de fornos siderúrgicos. Os materiais cerâmicos podem apresentar diversas propriedades de sua composição química. Conforme utilização do material, ele pode ter resistência à corrosão devido à umidade, resistência mecânica, resistência elétrica e resistência térmica (CARTER E NORTON, 2007).

Ainda de acordo com Carter e Norton (2007), os materiais cerâmicos têm algumas características que são muito úteis, dependendo do lugar onde serão empregados, tais como:

- a) Fácil modelagem em várias formas.
- b) Baixa perda dielétrica.
- c) Baixo coeficiente de dilatação térmica.
- d) Ótima resistência a choques térmicos.
- e) Alta flexibilidade.

Portanto, o uso de materiais cerâmicos possui um campo vasto. Entre suas áreas de aplicação estão: indústrias petrolíferas, área de telecomunicações, agricultura, redes elétricas entre outras.

Existem algumas subdivisões entre cerâmicas. Elas podem ser determinadas de acordo com suas matérias primas, as utilizações e até com o local de aplicação. A cerâmica ainda é muito usada, porém, no ramo de isoladores, ela vem cedendo espaço para materiais como polímeros que, mesmo sendo menos duradouros, tomam esse espaço devido a serem mais leves, mais fáceis de obter matéria prima, mais resistentes à corrosão, entre outros atributos (ROSA JUNIOR, 2010).

3.3.3 Aplicações, vantagens e desvantagens

Os usos para isoladores do tipo cerâmico são muito variados. No sistema elétrico, eles podem ser empregados na transmissão de alta tensão. Resistores podem ser produzidos de porcelana. Eles também podem ser utilizados fora da área da eletricidade, como em fornos siderúrgicos, telhas, tijolos, dissipadores de calor em placas de

computador, entre muitas outras aplicações (ROSA JUNIOR, 2010).

Para os produtores de isoladores cerâmicos existem algumas complicações, como:

- a) Obter matérias primas adequadas para os processos de fabricação.
- b) Adequar os processos para isoladores de grandes dimensões e em demandas cíclicas.
- c) Reduzir o tempo de fabricação.
- d) Baixar os custos e manter o mercado, já que cada vez mais surgem novos materiais.

3.3.4 Problemas ambientais e avanços

De acordo com Rosa Junior (2010), o problema ambiental mais observado em relação a este tipo de isolador é a sua deterioração em locais muito úmidos e com muito calor, porque, em condições favoráveis, o tempo de decomposição da porcelana, cerâmica mais empregada em isoladores, é alto. Também há o problema de resíduos em cerâmica vermelha nos fornos siderúrgicos, porque essa cerâmica absorve muito facilmente os resíduos poluentes das indústrias.

A evolução dos materiais cerâmicos é denominada “Cerâmica Avançada”. Nos dias de hoje, é muito usada em aparelhos eletrônicos e em outras tecnologias, pois, para o ramo de isoladores, aos poucos estão sendo substituídos por novos materiais.

Como exemplos de matérias primas dessa nova cerâmica, citam-se:

- a) Alumina.
- b) Esteatita.
- c) Nitreto de Silício.
- d) Zircônia.
- e) ZTA.

3.3.5 Conclusão

Cada vez mais o mercado de isoladores se diversifica e, com isso, novas tecnologias são introduzidas no dia-a-dia. Em virtude do crescente aumento dessas tecnologias, os materiais devem necessariamente passar

por um processo de evolução e reciclagem, podendo, dessa maneira, continuar no mercado.

Em relação ao material cerâmico, não foi diferente e as novas cerâmicas estão inseridas no estilo de vida, como também ocorre com outros tipos de materiais.

Isoladores do tipo cerâmico ainda são muito empregados por causa de suas resistências mecânica, dielétrica e também pelo fato de durarem por um longo tempo. Porém, isso não deixa seus produtores em posição confortável, tendo em vista que a velocidade com que aparecem novos materiais, como por exemplo os polímeros, é muito grande, não permitindo, desta forma, que os engenheiros da área fiquem ociosos (ROSA JUNIOR, 2010).

3.4 Isoladores Poliméricos

Uma classe mais ampla de materiais, por exemplo, a borracha e a maior parte dos plásticos, é razoavelmente boa para isolar a fiação e cabos elétricos, mesmo que venham a ter uma resistividade mais baixa que a maior parte de outros elementos. Tais materiais podem ter uso como isoladores práticos e seguros para baixas e moderadas tensões, que vão de centenas até milhares de volts (PROTZEK, 2010).

3.4.1 Teoria básica

De acordo com Callister Junior (1997), polímeros são compostos químicos de grande massa molecular e de extensas cadeias. Os polímeros são, então, macromoléculas constituídas por unidades básicas, os monômeros. Em si, os polímeros são diversos monômeros conectados formando uma extensa cadeia que se repete.

Podem ser divididos em polímeros naturais (achados na natureza) e polímeros artificiais. Como exemplo de polímeros naturais tem-se o DNA e o RNA (existentes na maior parte das células dos seres vivos); a borracha retirada das seringueiras é outro exemplo. Já os polímeros artificiais ou sintéticos são constituídos por reações de polimerização, que são reações onde as moléculas menores (monômeros) se conectam por valências principais para construir as moléculas mais longas, mais ou menos ramificadas, porém com as mesmas fórmulas centesimais. A tabela 2 mostra o ano de introdução de alguns polímeros artificiais no mercado.

Tabela 2 - Ano de introdução de alguns polímeros no mercado.

| Ano | Material | Ano | Material |
|------|-----------------------------------|------|----------------------------|
| 1930 | Borracha estireno-butadieno | 1943 | Silicones |
| 1936 | Poli(cloreto de vinila) (PVC) | 1944 | Poli(etileno teraftalato) |
| 1936 | Policloropreno (neopreno) | 1947 | Epóxis |
| 1936 | Poli(metil metacrilato) | 1948 | Resinas ABS |
| 1936 | Poli(acetado de vinila) | 1955 | Polietileno linear |
| 1937 | Poliestireno | 1956 | Poli(oximetileno) |
| 1939 | Nylon 66 | 1957 | Polipropileno |
| 1941 | Poli(tetrafluoroetileno) (teflon) | 1957 | Policarbonato |
| 1942 | Poliésteres insaturados | 1964 | Resinas ionoméricas |
| 1943 | Polietileno ramificado | 1965 | Poli(imidas) |
| 1943 | Borracha butilada | 1970 | Elastômeros termoplásticos |
| 1943 | Nylon 6 | 1974 | Poliamidas aromáticas |

Fonte: Protzek (2010)

Segundo Van Vlack (1980), os polímeros também podem ser classificados em termoplásticos, elastômeros, e termorrígidos.

Entre os mais comuns do dia a dia estão os termoplásticos. Sendo encontrados em diversos objetos, estes formam a maior parte dos plásticos conhecidos. O motivo para receberem esse nome é devido ao fato de, em altas temperaturas, eles apresentarem uma alta viscosidade, podendo, dessa maneira, ser moldados com facilidade. Esta característica torna mais fácil o processo de reciclagem dos polímeros, acontecendo o oposto nos termorrígidos.

Os termorrígidos são um tipo de polímero que tem como propriedade uma alta estabilidade a mudanças de temperatura. Contudo,

se sujeitados a temperaturas muito altas, será propiciada a decomposição do material, o que os torna muito difíceis de serem remodelados, acarretando em uma grande dificuldade para reciclar estes materiais.

Elastômeros são uma classe intermediária entre termoplásticos e termorrígidos. Eles não são fusíveis, porém demonstram uma alta elasticidade em temperaturas ambiente, com a possibilidade de serem esticados a duas ou até três vezes seu tamanho inicial, voltando depressa ao seu tamanho original após a remoção da tração. Estes são normalmente conhecidos como as borrachas.

Conforme Protzek (2010), materiais poliméricos são cada vez mais empregados para as mais distintas tarefas, pois demonstram uma grande durabilidade. Os plásticos prevalecem no mercado mundial de mercadorias, pois são resistentes e, principalmente, muito mais leves que outros materiais como metais e madeiras. Eles também são excelentes isoladores térmicos e elétricos.

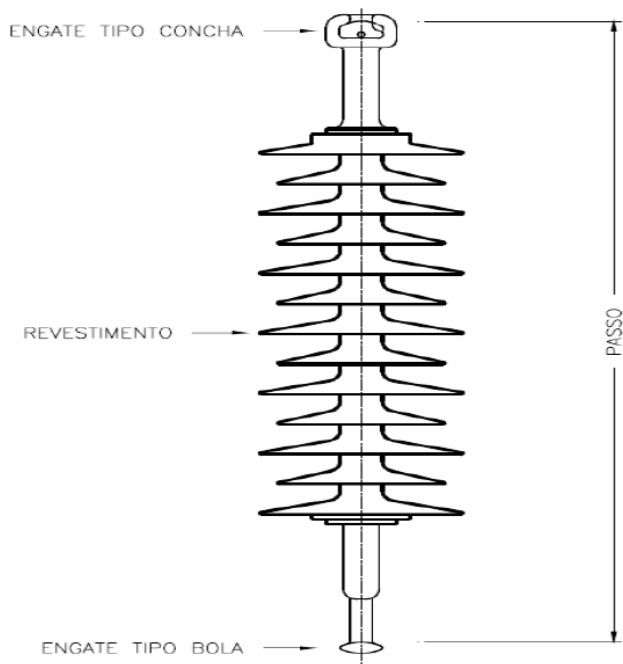
Uma comprovação disto é que, antigamente, os fios elétricos eram encapados com cerâmicas e hoje são encapados com plásticos, uma vez que estes são mais flexíveis que as porcelanas e preservam um mesmo nível de isolamento, o que é fundamental.

3.4.2 Produção de isoladores poliméricos

De acordo com Protzek (2010), isoladores para linhas de transmissão são essencialmente compostos de um núcleo de material condutor que é revestido por um material que é responsável por sua isolação.

A maior distinção entre os isoladores é a sua forma. Dentre elas, as mais frequentes são os tipo bastão, pino e pilar. O método mais usado para moldar os materiais poliméricos nos isoladores é a vulcanização, conforme mostrado nas figuras 4, 5 e 6

Figura 4 - Modelo de isolador.



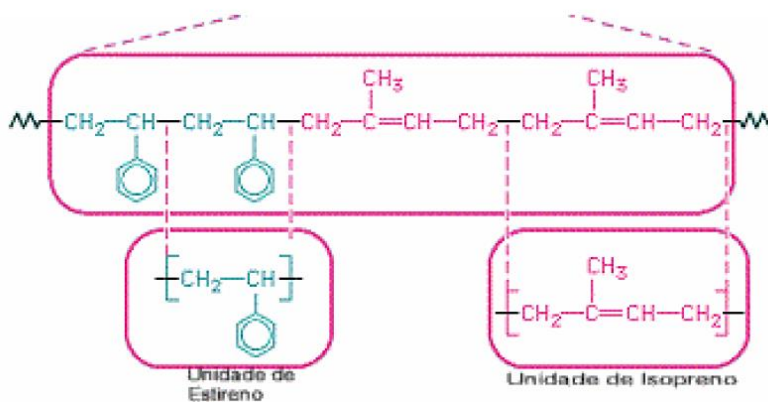
Fonte: Protzek (2010)

Figura 5 - Método de produção de polímeros por vulcanização.



Fonte: Protzek (2010)

Figura 6 – Exemplo de modelo estrutural polimérico.



Fonte: Protzek (2010)

Esse processo é definido pelo aquecimento do polímero a altas temperaturas na presença do elemento enxofre ou de óxidos metálicos. No caso de alguns polímeros sintéticos, o resultado é melhor com a vulcanização utilizando óxidos metálicos.

A vulcanização traduz-se na formação de ligações cruzadas nas moléculas do polímero individual, responsáveis pelo desenvolvimento de

uma estrutura tridimensional rígida com resistência equivalente à quantidade destas ligações.

Os isoladores poliméricos são recobertos por uma camada de materiais poliméricos e são utilizados, em sua maioria, para isolamento de linhas de transmissão de altas ou baixas tensões, mas podem ter inúmeras outras aplicações em engenharia elétrica (PROTZEK, 2010).

O estudo do tempo de vida dos materiais poliméricos é feito usando envelhecimento térmico acelerado. As taxas de degradação são definidas a altas temperaturas e tais dados são utilizados para extrapolar o desempenho do material em condições de temperatura ambiente. (IONE, PIAZZA, TOMOIOKA, 2003).

3.4.3 Vantagens entre os tipos de isoladores

A principal vantagem de isoladores poliméricos em relação a isoladores convencionais de vidro e porcelana é definida por Protzek (2010, p. 14) como:

Isoladores poliméricos exibem inúmeras vantagens sobre outros tipos de isoladores e sem dúvida a maior delas é o peso. Materiais poliméricos apresentam uma massa muito pequena em comparação com cerâmicas e vidros, os quais são mais comuns em isoladores, essa aparente “leveza” dos isoladores poliméricos possibilita uma redução significativa no peso das grandes torres das linhas de transmissão. Gerando assim uma economia, pois estas torres têm um grande crescimento de custo conforme aumenta seu tamanho (PROTZEK, 2010, p.14).

Mas além disso, existe outra vantagem muito importante, que é o foco do presente trabalho. Enquanto que a umidade e contaminação de isoladores cerâmicos e vítreos causa uma corrente de fuga e desligamentos de LT, o material polimérico é superior em se tratando de evitar essa corrente de fuga e consequente desligamento da LT.

3.4.4 Conclusão

Os isoladores poliméricos com alto grau de confiabilidade e vantagens estão se destacando em relação aos modelos vítreos e cerâmicos. São uma evolução no quadro geral de isoladores, proporcionando uma melhora nos indicadores de qualidade de transmissão de energia elétrica, permitindo também uma diminuição de custos em linhas de transmissão e em subestações de transformações de energia elétrica (PROTZEK, 2010), além de auxiliar na diminuição de desligamentos de linhas de transmissão em virtude de contaminantes e umidade no isolador.

3.5 Panorama dos isoladores no sistema de transmissão de energia elétrica brasileiro

Nas linhas de transmissão do setor elétrico brasileiro, estima-se que estejam distribuídos em torno de 5,5 milhões de isoladores nas linhas de transmissão com tensão inferior a 230 kV e 11 milhões de isoladores nas linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 230 kV, mais especificamente divididos de acordo com a tabela 3.

Tabela 3 - Distribuição percentual dos diferentes tipos de isoladores instalados.

| Isolador | | Carga Mecânica (kN) | Tensão (kV) | |
|-----------|------------|---------------------|-------------|-------|
| Tipo | Material | | < 230 | ≥ 230 |
| Suspensão | Porcelana | 80 | 24,3 | 15,4 |
| | | 120 | 3,6 | 8,2 |
| | | 160 | 0 | 1,7 |
| | Vidro | 80 | 50,3 | 24 |
| | | 120 | 18,9 | 46 |
| | | 160 | 0 | 3,6 |
| | Polimérico | 80 | 0,5 | 0,1 |
| | | 120 | 2 | 0,8 |
| | | 160 | 0 | 0,2 |
| Line post | Porcelana | 12,5 | 0,2 | 0 |
| | Polimérico | 110,7 | 0,2 | 0 |

Fonte: Garcia e Santos Filho (2003a)

Como observado pela tabela 3, mais de 90% dos isoladores no SIN são de vidro e porcelana. Seria inviável trocar todos esses isoladores por isoladores poliméricos. Então, aí é que surge o RTV, um material elastômero que dá características poliméricas a isoladores de vidro e porcelana e que pode ser utilizado para auxiliar na diminuição de desligamentos de energia por culpa de umidade ou contaminantes do ambiente.

Capítulo 4

O ISOLANTE *ROOM TEMPERATURE VULCANIZING*

Neste capítulo apresenta-se o isolante polimérico conhecido como *Room Temperature Vulcanizing* (RTV), suas características físico-químicas e relevância no cenário atual.

4.1 Introdução

Como exposto anteriormente, a contaminação de isoladores cerâmicos e vítreos causando corrente de fuga e desligamentos de LT gera um grande transtorno à sociedade.

Esse tipo de interrupção pode ser muito dispendioso. Por exemplo, uma interrupção de energia com duração de apenas um quarto de segundo pode desligar uma máquina de papel, resultando em horas de inatividade, possivelmente causando danos ao equipamento e prejuízos financeiros em produção perdida (CHERNEY, 1995).

A manutenção de isoladores ao ar livre tem sido uma arte aprendida através da experiência. Nesta arte, muitas tecnologias têm sido empregadas, com vários graus de sucesso. Os vários métodos e seus sucessos são resumidos na sequência.

4.2 Modificação do desenho de isoladores

De acordo com Cherney (1995), desde o desenvolvimento dos isoladores cerâmicos e vítreos, a técnica de design de isolador para condições de contaminação envolveu a modificação do tamanho, espaçamento e forma do isolador individual ou seções dos isoladores, a fim de obter o máximo possível de distância de fuga e o máximo possível de distância de fuga protegida por unidade de comprimento de isolador. Essa abordagem rendeu projetos como o isolador de nevoeiro para linhas de distribuição, isoladores de suspensão aerodinâmicos e tipo névoa para linhas de transmissão e pós isoladores para estações com numerosos compartimentos.

A distância de fuga, definida como o caminho mais curto entre duas partes condutivas medidas ao longo da superfície do isolamento, foi

o parâmetro de projeto mais importante, embora outros parâmetros, como o espaçamento de compartimento, de forma e diâmetro também sejam considerações importantes. Por outro lado, o tamanho, a forma e as características de formação de cerâmicas estão sujeitos a limitações. Portanto, novos conceitos, tais como isoladores resistentes de verniz, evoluíram, embora eles não tenham sido amplamente adotados.

Muitos projetos de isoladores foram desenvolvidos ao longo dos anos. No entanto, até o momento, nenhum padrão cobre o projeto ou desempenho de isoladores cerâmicos para ambientes contaminados.

A experiência com vários *designs* variou muito, mas depende das condições de aplicação. De um modo geral, isoladores exigem limpeza, a fim de evitar o desligamento, embora com frequência reduzida. O princípio orientador ainda parece ser instalar cadeias mais longas ou postes mais altos para locais mais sujos.

4.3 Isoladores não cerâmicos

Isoladores não-cerâmicos ou poliméricos foram inicialmente vistos como tendo um desempenho de contaminação superior em comparação com suas contrapartes de isoladores cerâmicos. Seu uso inicial em áreas severamente contaminadas resultou em muitas falhas. Ao mesmo tempo, houve várias aplicações de sucesso. Como resultado, o uso de isoladores não cerâmicos em áreas contaminadas se tornou um assunto controverso. Além disso, o uso de EPDM versus silicone também é disputado, embora o silicone, por causa de sua retenção de hidrofobicidade, tenha se tornado o material preferido para aplicações de classe de transmissão.

A principal preocupação com o uso de isoladores não cerâmicos em ambientes contaminados envolve o desenvolvimento de corrente de fuga e de descarga de banda seca na superfície dos isoladores.

A descarga de banda seca, se intensa o suficiente, pode destruir o material externo e precipitar a falha do isolador pela quebra do núcleo de fibra de vidro, o que pode levar o desligamento e/ou separação mecânica (CHERNEY, 1995).

4.4 Limpeza de isolador

Conforme Cherney (1995), a lavagem com água dos isoladores provou ser uma maneira de remover a contaminação solta das superfícies do isolador. A lavagem é muito eficaz para a remoção de sal de estrada, de oceano e de outras formas de contaminantes que não aderem bem à

superfície do isolante. Embora, alguns anos atrás, a lavagem com água fosse um método de manutenção econômico, este não é o caso hoje em muitas partes do mundo. Idealmente, os isoladores devem ser lavados a água antes de atingir o nível crítico de contaminação. Como não há meios disponíveis para determinar com precisão quando a lavagem deve ser feita, experiências passadas em períodos entre desligamentos tem sido usadas para estimar a frequência de lavagem. Como resultado, a lavagem é feita com muita frequência ou após o desligamento.

A limpeza com um produto para jateamento abrasivo, como noz moída ou caroço de milho e calcário, é um meio muito eficaz e eficiente para remover depósitos duros, como o cimento. No entanto, o uso frequente de um produto de limpeza com jateamento abrasivo removerá o verniz dos isoladores de porcelana e é uma prática que não deve ser usada em isoladores de vidro. Além disso, o depósito de material abrasivo seco nas estações é um risco de incêndio e deve ser removido. O processo de remoção é bastante tedioso e caro.

A limpeza com gelo seco é uma nova tecnologia que foi demonstrada ser um método eficaz e eficiente de limpeza de isoladores, sem ter os detritos de jato de ar convencional. O impacto das pelotas de gelo seco na superfície de um isolante limpa essa superfície pela liberação lateral de dióxido de carbono durante a sublimação. Nenhum dano é feito para o esmalte dos isoladores de porcelana ou de vidro. No entanto, o equipamento e o gelo seco ainda são muito caros. A técnica é ideal para limpeza de aparelhos, como por exemplo, o conjunto de cubículos de disjuntores, por causa do acesso restrito, e nos casos em que a água ou o método abrasivo seco não são realmente práticos.

4.5 Graxa

As graxas de hidrocarbonetos e silicone são revestimentos protetores móveis capazes de absorver contaminantes e agir para evitar desligamentos de duas maneiras. Primeiro, eles reduzem a tendência das gotas de água coalescerem em uma película contínua. Em segundo lugar, eles tendem a encapsular partículas de contaminação, evitando que elas adicionem condutividade à superfície. Ambas as graxas efetuam suas funções enquanto permanecem móveis.

Uma vez que a mobilidade é perdida por causa do excesso de contaminante absorvido na camada, elas vão quebrar sob a descarga de arco seco, formando caminhos. A alta temperatura localizada que é produzida durante a descarga de arco seco pode também fazer com que o material cerâmico subjacente se quebre.

No entanto, a maior objeção às graxas é o custo e trabalho tedioso de remover as camadas gastas. A massa de graxa em uma subestação completa pode chegar a milhares de quilos, o que exige panos e solvente, uma operação tumultuada e demorada. Além disso, o problema de descarte de graxa tornou-se mais difícil, pois os aterros sanitários não aceitam graxa gasta, e a única alternativa é a incineração, que possui um alto custo (CHERNEY, 1995).

4.6 Revestimentos

Nos últimos anos, segundo Cherney (1995), revestimentos sólidos repelentes à água, particularmente do tipo silicone, atraíram um interesse considerável. Uma fórmula de resina de fluoretano foi desenvolvida como uma superfície antiaderente para ajudar a manter as superfícies limpas. A resina foi modificada por agentes de silano acoplados e enchimento de trihidrato de alumina (*alumina trihydrate*), com a esperança de que isso se tornaria um revestimento útil para isoladores de alta tensão. No entanto, embora algumas aplicações experimentais tenham sido feitas, o interesse por essa tecnologia é muito baixo.

O revestimento de silicone líquido de RTV (vulcanização à temperatura ambiente) ganhou uma popularidade considerável desde o primeiro teste de campo, em 1973, com um produto experimental (HALL E ORBECK, 1982) e a primeira aplicação em larga escala, em 1987, com um produto comercial (CARBERRY e SCHNEIDER, 1989).

Embora poucos problemas tenham sido encontrados com o revestimento de primeira geração, ficou aparente com o uso que certas melhorias na tecnologia eram necessárias para se ter certeza de uma expectativa de vida mais longa. Essas melhorias incluíram: melhoria de adesão à porcelana, capacidade de resistir por mais tempo a períodos de desenvolvimento de uma corrente de fuga e desligamento, melhor imunidade à reversão ou despolimerização, aplicação de *spray* mais rápida e aplicação do revestimento enquanto a linha estiver ligada (CHERNEY, 1995).

4.7 Composição dos revestimentos da borracha de silicone RTV

De acordo com Cherney (1995), os sistemas comerciais de revestimento RTV consistem em um polímero de polidimetilsiloxano (PDMS), um enchimento de reforço, como sílica defumada, um enchimento de trihidrato de alumina (ATH), um corante pigmentado e um

agente de reticulação. O revestimento também pode conter PDMS líquido, enchimentos adicionais, um catalisador de condensação e um promotor de aderência para melhor união às superfícies cerâmicas.

Estes sistemas são dispersos em um solvente, geralmente nafta, embora o 1,1,1-tricloroetano ainda esteja em uso para aplicação em isoladores energizados. O solvente age meramente como um meio de transporte para transferir a borracha RTV para a superfície do isolador de porcelana.

Enquanto o solvente evapora, a umidade vinda do ar desencadeia a vulcanização, formando um revestimento de borracha sólida. A velocidade em que este processo ocorre depende do tipo de solvente, da temperatura e da umidade relativa. O processo de vulcanização é muito mais rápido com um solvente como o 1,1,1-tricloroetano. Sistemas de secagem rápida permitem que várias demãos possam ser aplicadas sem ceder ou escoar, produzindo assim um revestimento liso e uniforme.

A nafta é altamente inflamável e os sistemas de revestimento dispersos neste solvente não se destinam a aplicação em isoladores energizados. Sistemas de revestimento dispersos em materiais solventes não inflamáveis, como o 1,1,1-tricloroetano, podem ser aplicados em isoladores energizados por pessoal com conhecimento sobre a linha ligada.

As propriedades elétricas e físicas dos revestimentos variam consideravelmente, dependendo da sua formulação. Essas propriedades dependem da quantidade e do tipo de ATH e outros preenchedores, o grau de reticulação, a promoção da adesão e quantidade de fluido livre. Como parâmetro, pode-se adotar uma resistividade que varia entre $3,16 \times 10^{11}$ e $1 \times 10^{14} \Omega \cdot m$, permeabilidade próxima da do ar e permissividade em torno de quatro a seis vezes a do ar.

As propriedades de adesão à porcelana, repelência à água e a capacidade de resistir ao desenvolvimento de uma corrente de fuga são de suma importância para o desempenho do revestimento.

4.8 Características importantes dos revestimentos do RTV

Das características que são importantes em um revestimento RTV, a capacidade do revestimento para suprimir corrente de fuga (*leakage current suppressed*), e portanto, desligamento da linha é, sem dúvida, a propriedade mais importante. Essa característica é central para o conceito de revestimento de isoladores cerâmicos e vítreos com borracha RTV. A supressão da corrente de fuga é inteiramente governada pelas

características hidrofóbicas do silicone (CHERNEY, 1995).

4.8.1 Supressão da corrente de fuga

Vários estudos sobre a capacidade de supressão da corrente de fuga em revestimentos de RTV envolveram testes em uma câmara de névoa de sal ou em uma roda de rastreamento (KIM et al., 1990, 1991a, 1991b; KIM, 1992). Em ambos os testes, o início da corrente de fuga (*average leakage current*), como mostra a figura 7, indica a perda de hidrofobicidade. A perda de hidrofobicidade tem sido geralmente determinada através da medição do ângulo de contato. A espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) da superfície forneceu evidência de esgotamento do que tem sido postulado como “livre cadeias poliméricas” (por vezes referido como fluido de silicone livre) que se difundem da maior parte do revestimento para a superfície.

Este fluido livre também atua para transmitir a propriedade de não-molhamento para camadas de contaminação envolvendo as partículas com uma monocamada de silicone fluido. Como o fluido livre é gradualmente removido da superfície através da exposição constante à água, a superfície do revestimento perde sua capacidade de suprimir corrente de fuga. Após umedecimento constante, um revestimento de silicone se comporta como qualquer outro polímero. No entanto, ao contrário de outros polímeros, durante períodos secos (desde que sejam suficientemente longos), fluido livre adicional migra para a superfície, restaurando a hidrofobicidade ao revestimento.

A posição técnica atual do material de silicone para aplicações de uso externo é que um enchimento de tri-hidrato de alumina (ATH) é necessário para evitar erosão e criação de caminhos. Erosão e caminhos criados no silicone podem ocorrer quando a hidrofobicidade é temporariamente perdida e a descarga de arco seco vem a seguir.

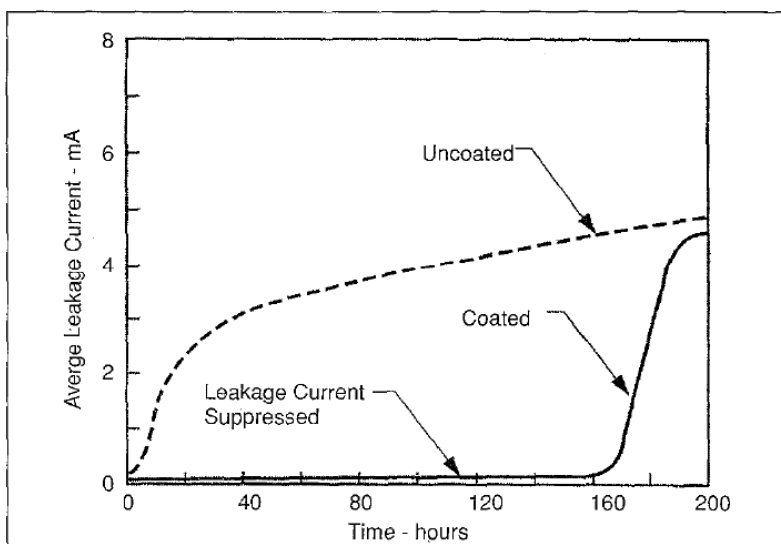
Um enchimento, quando adicionado à composição, tem um efeito duplo. Primeiro, um enchimento deslocará silicone e, portanto, resultará em redução da disponibilidade de fluido livre. A menos que seja compensado por uma mudança na fórmula, isso será visto em uma câmara de nevoeiro salino como um período de proteção reduzido contra a perda de hidrofobicidade e o desenvolvimento de corrente de fuga, como pode ser visto na figura 8.

Segundo, um enchimento pode ser visto como tendo o mesmo efeito do imbuimento de uma tela no revestimento, cuja presença retardará a difusão de fluido livre para a superfície. Através da medição dos espectros infravermelhos usando FTIR, maior enchimento na fórmula

de revestimento é visto como impedindo a difusão do fluido livre da maior parte do revestimento para a superfície, resultando em um tempo de recuperação mais longo (KIM et al, 1991b). Além disso, para um enchimento particular de distribuição de tamanho (DENG et al., 1995), existe uma concentração de enchimento que otimiza a proteção contra erosão e a criação de caminhos no material, como demonstrado na figura 9.

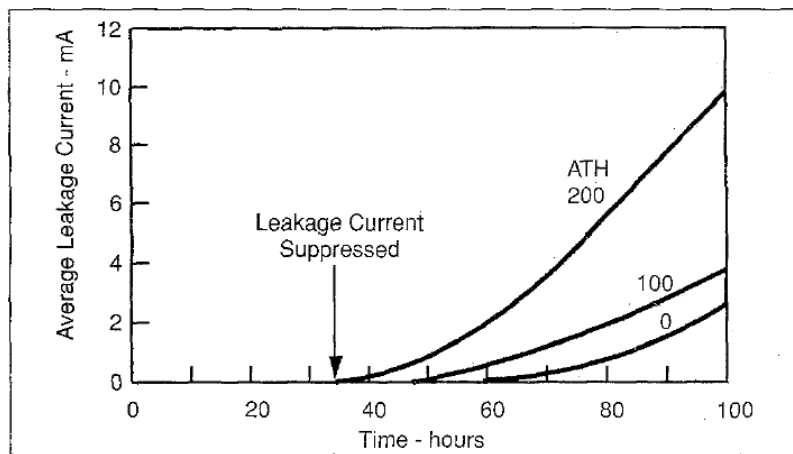
Enchimento carregado acima do nível ideal não só desloca o silicone adicional, mas também impede ainda mais a difusão do fluido livre para a superfície. Assim, a hidrofobicidade do revestimento depende da quantidade de fluido livre e da quantidade de distribuição de tamanho do enchimento de tri-hidrato de alumina (ATH).

Figura 7 - Supressão da corrente de fuga em um isolador revestido em uma câmara de sal-nevoeiro.



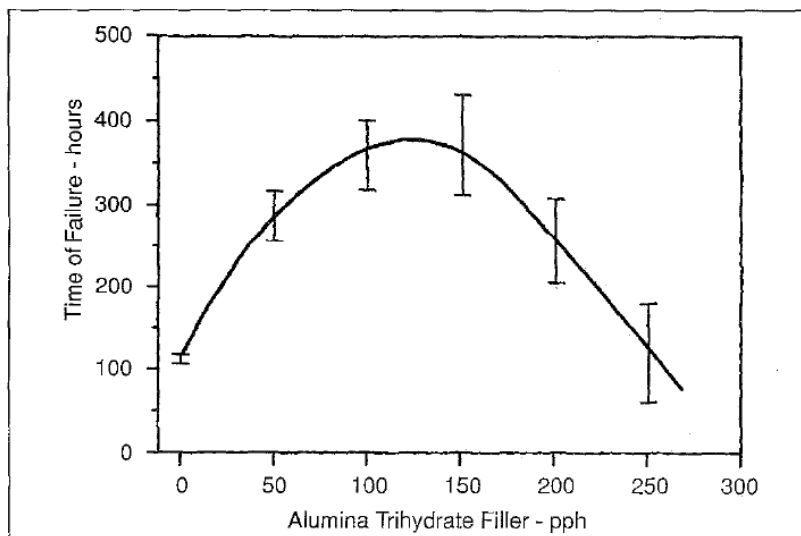
Fonte: Cherney (1995)

Figura 8 - O efeito da concentração de enchimento de ATH (em partes por cem da fórmula por peso) na proteção contra corrente de fuga conforme determinado em uma câmara de sal-nevoeiro.



Fonte: Cherney (1995)

Figura 9 - Tempo de falha (*time of failure*) em uma câmara de sal-nevoeiro em função da concentração de preenchimento ATH e para uma distribuição de tamanho particular de enchimento.



Fonte: Cherney (1995)

4.8.2 Adesão aos isoladores

Uma das primeiras aplicações de um revestimento RTV em um ambiente à beira mar trouxe à tona a importância da adesão do revestimento à superfície da porcelana (GORUR, 1995). Foi descoberto que o vento, carregado com sal, tinha causado o corte de erosão no revestimento. O vento constante eventualmente levantou o revestimento da superfície, permitindo que a umidade carregada com sal entrasse em contato com a porcelana sob o revestimento, criando uma condição indesejável para o desempenho de revestimento. Pela mesma razão, o sucesso de aplicações RTV em ambientes desérticos exigirão adesão para a porcelana.

A importância da adesão do revestimento foi trazida novamente à tona em ainda outro tipo de aplicação, adjacente a uma fábrica de cimento. Neste tipo de ambiente, o desempenho do revestimento é um pouco reduzido devido à rápida acumulação de cimento. A lavagem com água em um ciclo prolongado é necessária para evitar o curto-circuito elétrico do isolador. Como este tipo de contaminante não se liga ao revestimento RTV, mas forma uma camada espessa de cimento ao redor do isolador, a lavagem com água a alta pressão remove bastante facilmente o contaminante.

Remover o cimento de isoladores revestidos com RTV é muito mais fácil do que em isoladores não revestidos, onde ocorre a colagem do cimento com a porcelana e é necessária a limpeza dos isoladores com jateamento abrasivo. No entanto, se o revestimento não tem boa adesão à porcelana ou se a porcelana não foi adequadamente limpa em preparação para o revestimento RTV, a limpeza de manutenção usando água a alta pressão remove a ambos, o cimento e o revestimento.

Estas situações ocorreram com um revestimento de primeira geração. Os revestimentos de primeira geração não foram formulados com um promotor de adesão e, portanto, não se aderiu ao isolador, mas envolveu o isolador como uma borracha bem justa. Os revestimentos atuais contêm um promotor de adesão, que resulta em excelente ligação à superfície do isolador. Revestimentos de segunda geração podem ser usados em áreas costeiras e também devem ser lavados com água a uma pressão total de 1200 psi para remover contaminantes.

Para testar a aderência, um teste com água fervente foi provado ser útil. Um isolador, preparado da maneira prescrita, é primeiro revestido usando o equipamento à mão. O isolador é então imerso em água, fervido

por 72 horas e removido. Revestimentos que não aderem à porcelana irão exibir bolhas de água na interface entre a porcelana e o revestimento (CHERNEY, 1995).

4.8.3 Cor do revestimento

Conforme Cherney (1995), cores de revestimento em uso no momento são o branco e vários tons de cinza. Normalmente, uma cor é selecionada para a facilidade visual de avaliar a cobertura do revestimento de isoladores coloridos em tons de cinza, chocolate e esmaltados, bem como uma ajuda visual à espessura. O branco às vezes é especificado porque um contaminante aparece prontamente. No entanto, isso não é uma boa ideia, pela seguinte razão.

Em isoladores não revestidos, os usuários normalmente associaram a presença de contaminantes com a necessidade de limpeza. No entanto, em revestimentos RTV, esta associação não deve ser feita. Portanto, um revestimento branco pode apresentar preocupações indevidas aos usuários. Como o contaminante não aparece tão prontamente nas cores escuras, o cinza escuro é uma cor muito melhor para revestimentos.

4.8.4 Controle de queda e fluxo

A formulação do revestimento deve ser tal que, quando pulverizado, o material fluirá suficientemente na superfície do isolador, amalgamando para formar uma superfície contínua e lisa, ainda que não fluindo demais em superfícies verticais para formar pingos e pingentes de revestimento ao longo das nervuras em compartimentos do isolador

Este último efeito é referido como controle de queda e é realizado através da formulação do revestimento. Embora a aparência do revestimento não seja realmente preocupante, o fluxo excessivo resultará, sem dúvida, em uma cobertura reduzida por galão de revestimento (CHERNEY, 1995).

4.8.5 Construção de película.

Segundo Cherney (1995), as propriedades de construção de película de um revestimento ditam o máximo de espessura que pode ser

obtida, em uma única passagem, usando equipamento de *spray*. Portanto, elas terão um grande impacto no tempo gasto em um projeto.

Como regra geral, o custo do projeto de revestimento é de aproximadamente 30 % de material e 70 % de mão de obra. Portanto, a construção da película terá um impacto significativo no custo de um projeto de revestimento. Viscosidade do material, características de afundamento e a superfície de acabamento do substrato afetarão a construção da película. O afundamento também é um pouco afetado pelas características de adesão e descascamento do revestimento.

4.8.6 Espessura do revestimento

A espessura nominal sugerida por vários fabricantes de revestimento é de 20 milésimos de polegada. Esta espessura é um prático “guia de orientação” que tem sido usado por muitos anos na indústria de revestimento. Todavia, tem pouca importância para o revestimento de isoladores elétricos. A experiência até agora sugere que a espessura do revestimento não é fator crítico no desempenho ou na vida útil do revestimento. Espessuras de revestimento variando na faixa de 4 a 29 milésimos de uma polegada foram aplicados em campo, com igual sucesso.

Entretanto, testes de laboratório em revestimentos em uma câmara de sal-nevoeiro mostram que, quando uma corrente de fuga de magnitude danosa se desenvolve, a espessura desempenha um papel na expectativa de vida do revestimento. Revestimentos grossos fornecem maior resistência térmica ao calor produzido pela descarga de arco seco e não permitem que o calor seja conduzido para o substrato de porcelana tão rapidamente quanto em revestimentos mais finos.

Assim sendo, revestimentos espessos resultam em pontos locais de temperaturas mais altas durante a descarga de arco seco, causando assim, uma degradação térmica acelerada do revestimento. Por outro lado, um revestimento que é muito fino será degradado muito rapidamente por causa da quantidade insuficiente de material. Testes indicam que uma espessura na faixa de 15 milésimos de uma polegada é o melhor (DENG et al., 1996).

Existem apenas dois testes não destrutivos que podem ser realizados em revestimentos RTV para verificar a espessura. Estes são o uso de um medidor para película úmida e um medidor ultrassônico para espessura. Medidores para película úmida dão uma leitura sobre a

espessura enquanto esta é aplicada. Para determinar a espessura da película seca, subtrai-se a percentagem de solvente. Para, por exemplo, 20 milímetros de material úmido em 70 % de componentes sólidos irão fornecer 14 milímetros de revestimento curado. Os aplicadores normalmente irão obter leituras frequentes de película úmida. Manômetros ultrassônicos de espessura lerão a espessura do revestimento de silicone curado em superfícies de porcelana. Estes manômetros devem ser calibrados para RTV em porcelana e podem ser verificados antes de serem usados.

4.9 Aplicação do revestimento

Após o desempenho, a facilidade de aplicação é a segunda característica mais importante de um revestimento RTV. Considerações sobre aplicação incluem a preparação do isolador, a preparação do material, o equipamento e a aplicação energizada. Estas condições tem um impacto significativo no custo da aplicação no projeto (CHERNEY, 1995).

4.9.1 Preparando o isolador

Os isoladores a serem revestidos devem estar completamente limpos e secos. Na maioria dos casos, os isoladores só precisam ser lavados com água sob alta pressão. Isoladores contaminados com materiais semelhantes a cimento devem ser limpos com um produto de limpeza para jateamento abrasivo, como caroços de milho esmagados ou cascas de nozes misturadas com calcário.

Isoladores sujos de graxa são muito difíceis de limpar. Uma vez que a maior parte a graxa tenha sido removida usando um limpador para jateamento abrasivo ou simplesmente com limpeza à mão, a superfície deve ser limpa à mão usando um solvente para remover a película residual de graxa. Alcool Isopropílico é recomendado para a limpeza final. A operação de revestimento pode começar uma vez que os isoladores estejam secos.

4.9.2 Preparando o material

Assim como qualquer tinta com alto teor de sólidos, a preparação do material se refere à mistura de sólidos sedimentados antes do uso, o que é necessário se o revestimento foi mantido em armazenamento por algum tempo. Revestimentos grossos, que inicialmente parecem ter um valor muito melhor, devem ser diluídos com um solvente no campo para facilitar a aplicação com spray.

No campo, a diluição é demorada e requer a uso de solventes no local de trabalho. Além disso, a aplicação em campo não é muito propícia para a medição cuidadosa de aditivos, o que significa que cada pote de revestimento tem potencial para ter uma consistência diferente. Portanto, é melhor especificar um revestimento pronto para uso após a mistura simples.

4.9.3 Tipo de equipamento

Os revestimentos de borracha de silicone do RTV podem ser aplicados com pulverizadores de ar ou equipamento de pulverização sem ar. Um tipo de sistema comumente usado se assemelha a uma panela de pressão de aço, equipada com um agitador de ar e com reguladores duplos, um para fluido e outro para ar.

O agitador garante que os sólidos permaneçam em suspensão ao longo da aplicação de pulverização. Como o enchimento pode ser simplesmente retirado da lata e ser adicionado ao líquido na panela de pressão, o misturador é, também, bastante útil na dispersão de enchimento que permaneceu muito tempo armazenado e apresentou decantação. Forros de plástico descartáveis para a panela de pressão certamente reduzirão o tempo de limpeza.

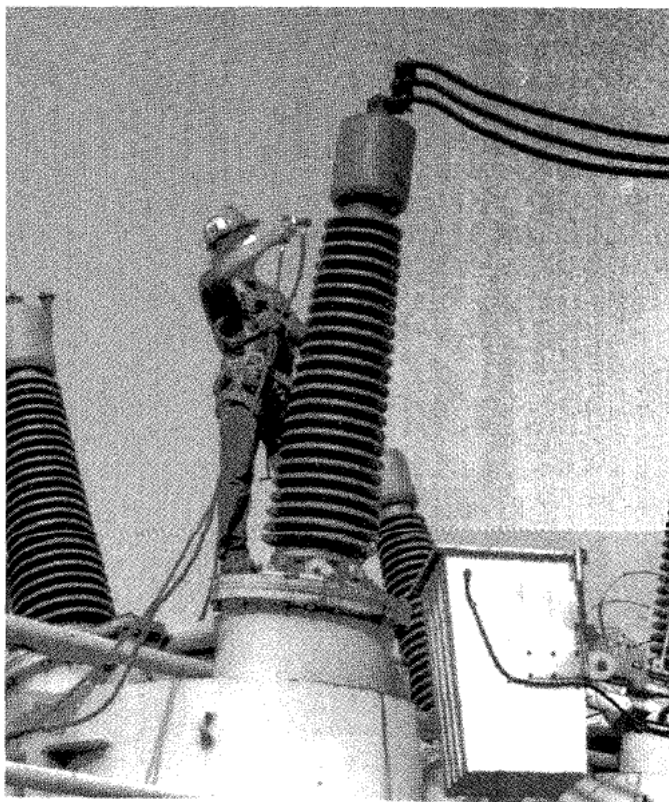
A fim de minimizar o excesso de pulverização e, portanto, a perda de material, recomenda-se uma pistola de alto volume e baixa pressão. Um filtro de ar que remove o óleo e outros contaminantes do suprimento de ar comprimido é altamente recomendado. Em ambientes muito úmidos, um secador para remover a umidade do suprimento de ar irá reduzir a formação de peles na panela de pressão e na pistola de *spray*.

A limpeza pode ser feita usando vários solventes diferentes, incluindo nafta e aguarrás mineral. Simplesmente se substitui solvente para o revestimento e se pulveriza em uma lata vazia para limpar a linha

de revestimento e a pistola. Se for usado um forro de plástico, nenhuma limpeza na panela é necessária, já que o forro pode simplesmente ser descartado. É importante garantir que o equipamento utilizado permaneça dedicado para o revestimento de silicone. Outros revestimentos podem deixar resíduos que podem contaminar o silicone.

Uma aplicação típica usando equipamento de pulverização de ar convencional é mostrada na figura 10.

Figura 10 - Aplicação de pulverização do revestimento RTV com ar convencional, usando uma pistola de alto volume e baixa pressão.



Fonte: Cherney (1995)

4.9.4 Aplicação energizada.

Sistemas de revestimento dispersos em solventes não inflamáveis, tais como o 1,1,1-tricloroetano, podem ser aplicados ao equipamento energizado usando um sistema de pulverização sem ar e uma vara quente, como mostrado na figura 11. Isto deve ser feito sob estrita supervisão e realizado somente por equipes experientes em trabalhos em linhas energizadas.

O equipamento de pulverização sem ar evita os problemas associados à vida útil em equipamentos de pulverização de ar convencionais. No entanto, como as taxas de deposição são geralmente mais altas do que as do equipamento de pulverização com ar, o empoeiramento é geralmente um pouco maior.

Deve-se notar que a aplicação energizada não permite medição de espessura e a perda de material é muito maior do que com a aplicação convencional.

Figura 11 - Aplicação com pulverização sem ar de revestimento RTV para isoladores de chave de 138 kV usando uma vara quente



Fonte: Cherney (1995)

4.10 Expectativa de vida

O fim de vida útil de um revestimento é definido pela sua capacidade de prevenir desligamentos. Esta definição não se refere à vida, mas sim ao desempenho de revestimento. Existem algumas aplicações onde a performance do revestimento é menor do que a desejável devido à alta taxa de acumulação de contaminantes e lavagem insuficiente. Estas aplicações são geralmente muito próximas da fonte de contaminação. Nestas aplicações, o desempenho do revestimento pode ser estendido pela manutenção da limpeza, que obviamente não será necessária com a mesma frequência que seria em isoladores não revestidos.

Nestas aplicações, o contaminante é geralmente do tipo cimento e prontamente forma uma crosta espessa em isoladores revestidos. Este tipo de camada contaminante não se liga à camada de borracha e é facilmente removido por lavagem com água a alta pressão. Em isolantes não revestidos, um contaminante deste tipo prontamente se liga à superfície dos isoladores e não pode ser removido por lavagem com água. A remoção em isoladores não revestidos é normalmente feita por técnicas de jateamento a seco de alta pressão, a um custo considerável.

A vida útil do revestimento é definida mais precisamente como a condição na qual a hidrofobicidade não é mais transferida para camadas depositadas, ou onde a manutenção não se torna diferente do que a usada em isoladores não revestidos. Vários estudos foram realizados em materiais de silicone, a fim de elucidar a questão da vida útil (CHANG e GORUR, 1994; KIM et al., 1994). No entanto, até hoje nenhuma resposta foi oferecida. Alguns revestimentos comerciais estão em serviço há 10 anos ou mais, com pouca ou nenhuma evidência de mostrar o fim da vida útil. Existem, no entanto, condições especiais que devem ser consideradas, que são o efeito Corona e a reversão do revestimento.

4.10.1 Efeito Corona

Em alguns projetos de cadeias de isoladores, a descarga de corona ocorre a partir da ferragem, nas extremidades energizadas dos isoladores. Esta corona está no ar e às vezes pode colidir com o esmalte da porcelana. No entanto, como a energia é bastante baixa, o esmalte da porcelana não é afetado. Este não é o caso quando a porcelana foi revestida com RTV e

há a expectativa de que o revestimento envelheça.

O mecanismo de envelhecimento é aquele em que o calor da descarga de corona resulta na separação de grupos orgânicos e, na presença de ozônio, leva a um grau cada vez maior de reticulação, que se manifesta pelo aumento da dureza do revestimento. Com o tempo, o revestimento se torna quebradiço na área afetada e propenso a rachaduras que se assemelham a lama seca, que se estendem abaixo do revestimento não exposto.

Embora a difusão do fluido livre seja o mecanismo de recuperação hidrofóbica, exposição a corona prolongada acabará por formar uma camada de silicato molhável na superfície. Quando isso ocorre, o revestimento atinge sua vida útil e deve ser removido, mas apenas na área afetada (ELDRIDGE et al., 1999). Este problema pode ser evitado usando anéis de corona devidamente selecionados na extremidade da linha da cadeia de isoladores de porcelana.

4.10.2 Reversão

A cadeia de polissiloxano é geralmente considerada hidroliticamente estável, mas parece haver evidências de que o intemperismo do polímero é melhor explicado por uma lenta despolimerização que ocorre na presença de umidade e acelera na presença de chuva ácida (ELDRIDGE et al., 1999). A hidrólise causa cisão aleatória da cadeia polimérica, levando a uma rápida diminuição da massa molecular. A temperatura é um fator e o estresse elétrico pode, também, contribuir para acelerar o processo. A redução do polímero a uma massa pegajosa é chamada de reversão.

Para a reversão de um revestimento acontecer, a umidade deve residir dentro do revestimento. Em outras palavras, o revestimento deve ser poroso, decorrente de aplicação indevida, o uso de certos tipos de preenchimentos que aumentam a umidade ou um problema na formulação de revestimento. Um teste simples para a reversão de um revestimento aplicado à porcelana é feito com água fervente. Depois de ferver em água por 100 horas, a maioria dos revestimentos exibirá algum amolecimento, mas eles não devem se reduzir a uma massa que se assemelha a massa de vidraceiro comum.

4.10.3 Reaplicação

Os isoladores que não mostram reversão podem ser revestidos novamente após limpeza com água. No entanto, em algumas aplicações, um detergente será necessário para auxiliar na limpeza. Um revestimento que atingiu sua vida útil pode ser removido usando métodos convencionais para a limpeza seca de isoladores de porcelana. Uma vez que o revestimento tenha sido removido, material novo pode ser aplicado, sem qualquer preparação (CHERNEY, 1995).

Capítulo 5

ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta um estudo de investigação de possível correlação entre condições climáticas e desarme de proteção (*protection trip*) de uma linha de transmissão de 230 kV no sul do Brasil. Esta linha de transmissão tem uma história de queda de energia durante o inverno, desde sua operação inicial em 1974. A maioria dessas interrupções são causadas por falhas monofásicas localizadas aleatoriamente ao longo da linha (MUSTAFA et al., 2012).

Consequentemente, muitos estudos foram feitos para identificar a principal razão para esses eventos, incluindo agora a investigação da influência da umidade relativa do ar, índice pluviométrico e direção do vento nesta região, para justificar esses problemas que afetam a confiabilidade dos sistemas de proteção dessa linha de transmissão. Assim, os resultados preliminares mostrados neste trabalho permitem identificar correlação entre falhas e condições climáticas locais.

Este capítulo também apresenta um estudo de soluções sobre os desarmes da proteção desta mesma linha de transmissão de 230 kV no sul do Brasil, com base no uso de isoladores com RTV-SR (*Room Temperature Vulcanized Silicone Rubber*). Também são mostradas algumas das soluções que estão sendo implementadas pela companhia elétrica e os resultados obtidos.

5.1 Introdução

O Brasil é um país muito grande, com um sistema de energia elétrica consideravelmente grande e interligado e, portanto, longas linhas de transmissão percorrem lugares com condições climáticas significativamente diferentes. Uma delas é uma linha de transmissão de 230 kV que fica no estado do Rio Grande do Sul, sul do Brasil, entre as subestações de Camaquã (CAM) e Presidente Médici (UPME), com um comprimento de cerca de 200 km, sem barra de carga entre elas, e sob a responsabilidade da empresa pública de energia, CEEE - Companhia Estadual de Energia Elétrica.

Desde que esta linha de transmissão foi colocada em uso, ela frequentemente apresenta desarmes indesejados de proteção, que são representados principalmente por falhas monofásicas com localização aleatória ao longo do seu comprimento, o que sugere que alguma outra preocupação deve ser colocada, além daquelas geralmente consideradas em qualquer estudo clássico de coordenação de isoladores. Uma dessas preocupações pode estar em influência não habitual das condições meteorológicas, que é a base da abordagem deste capítulo. Por uma questão de melhor conhecer esta linha de transmissão, na tabela 4 são apresentados alguns de seus principais parâmetros elétricos, enquanto que, na figura 12, mostrada a sua localização.

Em relação à proteção, esta linha de transmissão é servida por um esquema de teleproteção do tipo bloco, no qual as proteções primárias e secundárias e com direção neutra de sobrecorrente (67N) e relés de distância (21) operam perfeitamente para os principais tipos de falhas. No entanto, um problema significativo é o número relativamente alto de interrupções forçadas, por exemplo, em 2010 foram contabilizadas um total de 93. Essas interrupções forçadas são causadas por faltas monofásicas fase-terra, que operam o primeiro esquema de proteção e o dispositivo de religamento automático (MUSTAFA et al., 2012).

Assim, várias ações foram realizadas pela equipe técnica da CEEE ao longo dos últimos 36 anos tentar para resolver este problema, incluindo a substituição e o aumento do número de peças de várias cadeias de isoladores, bem como o redimensionamento do sistema de aterramento das estruturas. Infelizmente, nenhuma dessas ações parece ter causado qualquer redução significativa no número de faltas monofásicas fase-terra e, portanto, das interrupções.

Portanto, em um projeto recente apoiado pela CEEE, foram investigados vários dados relacionados ao comportamento desta linha de transmissão, que deu origem a várias possíveis razões para este problema, que vão desde os de natureza elétrica, como a ocorrência de sobretensão devido a ressonância harmônica, até problemas de natureza meteorológica, que é a base deste capítulo. Especificamente, é considerada a existência de outro motivo para tais interrupções, que pode ser baseada em uma possível correlação entre os eventos de desarme da proteção e, eventualmente, alguma condição climática extrema ou incomum que pode estar causando essas falhas. Isso ajudaria a CEEE atenuar esse problema (MUSTAFA et al., 2012).

Análises sobre este motivo são apresentadas na seção seguinte, com base na análise de condições climáticas, especialmente os parâmetros que são geralmente levados em consideração sobre a coordenação de

isolamento, investigando a excepcionalidade de algum deles na região ao longo da qual esta linha de transmissão opera.

Tabela 4 - Parâmetros elétricos da LT.

| | |
|---|----------------------|
| Length (km) | 197 |
| Voltage Class (kV) | 230 |
| Type of conductor | GROS 636230S |
| + Sequence Impedance (Ω) | $19,785 + 99,0817i$ |
| 0 Sequence Impedance (Ω) | $67,500 + 196,2061i$ |
| + Sequence Admittance (Ω^{-1}) | $89,745i$ |
| - Sequence Admittance (Ω^{-1}) | $89,745i$ |
| Current capacity in operation (A) | 677,7 |

Fonte: Mustafa et al. (2012)

Figura 12 - Localização geográfica da linha de transmissão entre subestações CAM e UPME no sul do Brasil.



Fonte: Mustafa et al. (2012)

5.2 Condições meteorológicas

O clima de qualquer região pode ser caracterizado pelo monitoramento, durante um período de tempo, das condições meteorológicas agindo em um localização particular. No Brasil, a caracterização do clima é desenvolvida com base na análise de grande quantidade de dados, definida pela *World Meteorological Organization* (WMO) e pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

O clima no estado do Rio Grande do Sul é considerado subtropical com um comportamento bem definido, com invernos de baixa temperatura (12 °C, em média) e verões quentes (32 °C, em média), com chuva bem distribuída ao longo do ano (CAMARGO, 2002).

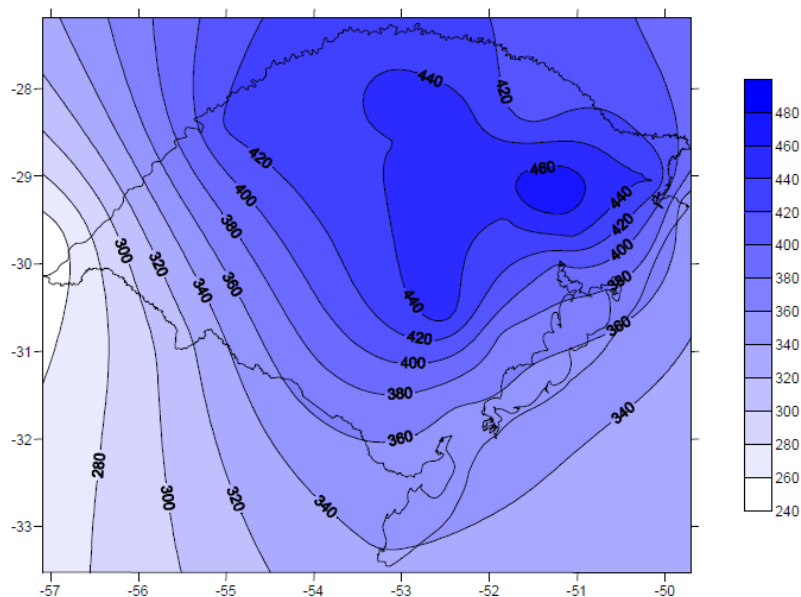
Ao lado da temperatura, o índice pluviométrico (*rainfall index*), a umidade relativa do ar (*relative humidity*) e a velocidade do vento (*wind speed*) são os parâmetros mais representativos usados para definir as condições climáticas em qualquer região. Assim, esses três fatores serão analisados, tendo em vista investigar a possibilidade de estabelecer uma correlação entre qualquer um deles e o número indesejado de desarmes da proteção da linha de transmissão UPME-CAM

5.2.1 Índice pluviométrico

No estado do Rio Grande do Sul, a média anual do índice pluviométrico mensal é de cerca de 139,2 mm, com os meses de outubro e janeiro, apresentando valores médios de 163,9 mm e 162,7 mm, respectivamente. O mapa da figura 13 mostra a distribuição do índice mensal de chuvas, em mm/m² ao longo do estado do Rio Grande do Sul, durante o inverno, considerado como um período chuvoso.

A partir da figura 13, pode-se notar que o sul e o leste locais, onde a linha UPME-CAM se encontra, apresentam valores de índice pluviométrico que variam de cerca de 360 mm a 420 mm (CAMARGO, 2002).

Figura 13 - Distribuição do índice mensal de chuvas durante o inverno no estado do Rio Grande do Sul.

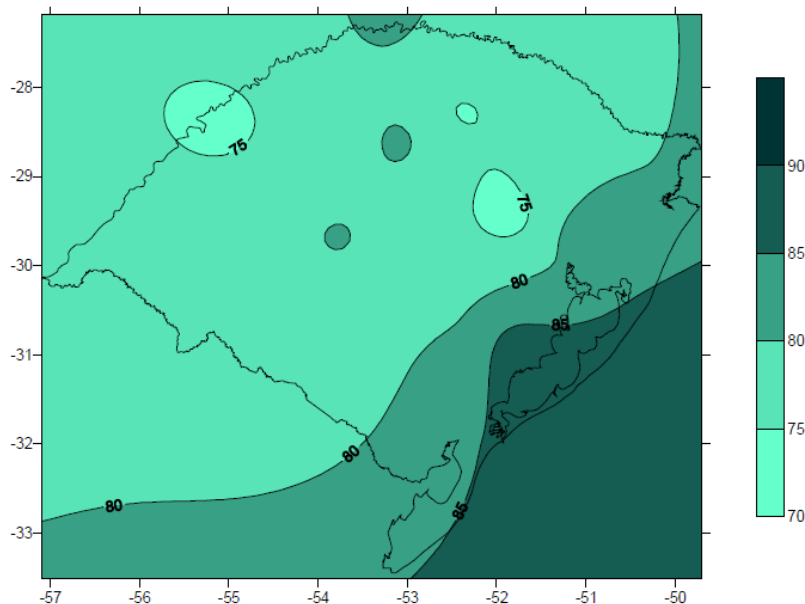


Fonte: Camargo (2002)

5.2.2 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar sobre o estado tem maiores valores médios registrados durante o mês de junho, que é de 81,4 %, enquanto o valor médio anual sobre o estado é 77,6 %. A figura 14 mostra a distribuição sazonal de umidade do ar sobre o estado, no inverno. Assim, pode ser notado que, enquanto a umidade relativa do ar é relativamente alta em todo o estado, o sul e o leste, onde a linha UPME-CAM está, tem níveis ainda mais altos de concentração de umidade do ar, variando de 80 a 85 % no inverno, que é quase o mesmo índice do outono, que também deve ser considerado (CAMARGO, 2002).

Figura 14 - A distribuição sazonal de umidade relativa do ar durante o inverno.



Fonte: Camargo (2002)

5.2.3 Velocidade do vento

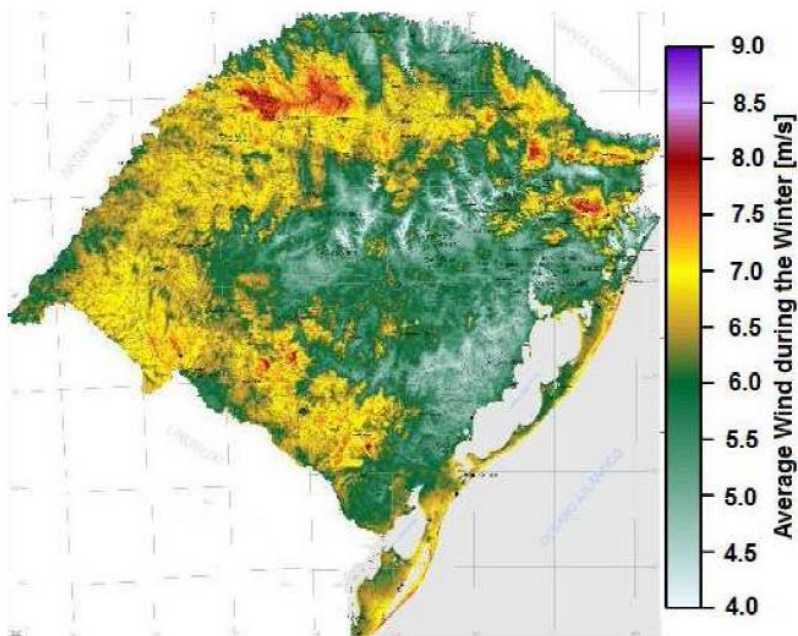
Por fim, outro parâmetro meteorológico que merece atenção considerável é a velocidade do vento, já que reflete o movimento contínuo do ar no ambiente. No estado de Rio Grande do Sul, ventos mais rápidos ocorrem na segunda metade do ano, resultando em velocidade média anual do vento entre 5,5 m/s e 6,5 m/s. Na área sudeste, onde está localizada a subestação UPME, a velocidade média anual do vento está entre 7,0 m/s e 8,0 m/s. A velocidade do vento se torna mais rápida durante a noite, com valores de pico ocorrendo entre 22 h e 6 h.

O mapa da figura 15 mostra a velocidade média do vento sobre o estado do Rio Grande do Sul (CAMARGO, 2002), em um ponto de medição de 50 m de altitude durante o inverno.

Assim, após esta breve análise de três dos mais importantes parâmetros da condição meteorológica ao longo do local onde o linha de

transmissão UPME-CAM se encontra, uma análise mais detalhada é feita e apresentada na próxima seção para a avaliação real de suas possíveis influências no número de falhas de LT.

Figura 15 - Velocidade média do vento durante o inverno, ao longo do estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Camargo (2002)

5.3 Estudo da correlação entre parâmetros das faltas e condições meteorológicas

De acordo com os princípios da Estatística, duas variáveis estão ligadas por uma relação de causa e efeito são necessariamente correlacionadas. Assim, no que diz respeito à linha de transmissão UPME-CAM, a tabela 5 mostra o número de desarmes da proteção por mês(*month*) sob boas condições climáticas (sem relâmpagos de

tempestade, por exemplo), obtida pela CEEE, no período de janeiro de 2009 até agosto de 2010. Para cada mês, o número de desarmes foi totalizado e relacionado proporcionalmente ao total número de desarmes. Nesta tabela, a última coluna mostra claramente que a maioria dos eventos ocorreu sob boas condições meteorológicas (*good weather*).

Assim, tomando o banco de dados meteorológicos do INMET, foi realizado um estudo de correlação entre os desarmes da proteção da linha de transmissão e os dados previamente analisados e parâmetros descritos, índice pluviométrico, umidade relativa do ar e velocidade do vento, durante os anos de 2007 a 2010, para o região em que a linha UPME-CAM atravessa (MUSTAFA et al., 2012).

Tabela 5 - Comparação dos números de desarmes da proteção sob boas condições climáticas comparado ao número total de desarmes.

| Months | 2009 | 2010 | 2011 | Total (%) |
|--|-------------|-------------|-------------|------------------|
| 1 | 0 | 2 | 5 | 100 |
| 2 | 0 | 4 | 0 | 66.67 |
| 3 | 3 | 5 | 2 | 100 |
| 4 | 1 | 4 | 6 | 91.67 |
| 5 | 10 | 14 | 8 | 100 |
| 6 | 15 | 17 | 15 | 100 |
| 7 | 21 | 21 | 13 | 98.21 |
| 8 | 5 | 13 | 14 | 96.97 |
| 9 | 5 | 4 | - | 100 |
| 10 | 2 | 3 | - | 100 |
| 11 | 2 | 2 | - | 100 |
| 12 | 2 | 1 | - | 100 |
| Protection Trips under Good Weather | 66 | 90 | 63 | 219 |
| Total Protection Trips | 68 | 93 | 63 | 224 |

Fonte: Mustafa et al. (2012)

Para avaliar o grau de correlação entre o números de eventos e qualquer um dos parâmetros meteorológicos, foi avaliado o fator de correlação (correlation factor), definido por Miles e Shevlin (2001) como:

$$C(Y_1, Y_2) = \frac{Cov(Y_1, Y_2)}{(\sigma_{Y_1} \cdot \sigma_{Y_2})} \quad (1)$$

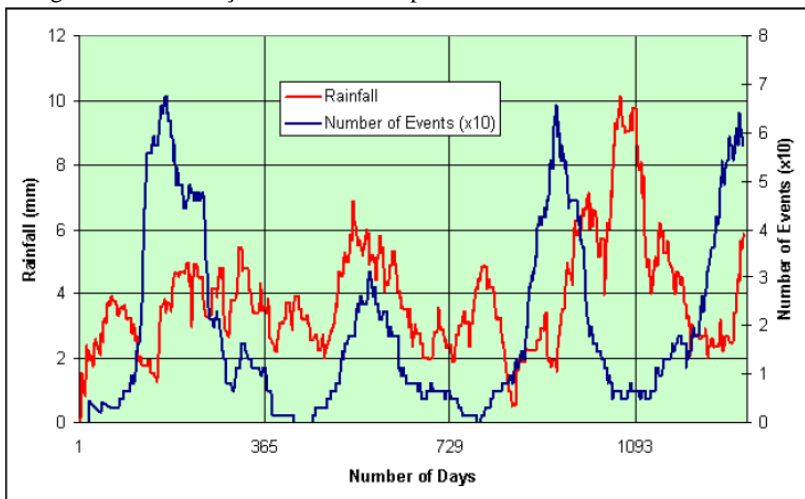
Y_1 e Y_2 são dois conjuntos de dados, σ_{Y_1} e σ_{Y_2} são seus respectivos desvios-padrão e Cov é a covariância, definida como:

$$Cov(Y_1, Y_2) = \frac{1}{N} \sum (Y_1(i) - \mu_{Y_1})(Y_2(i) - \mu_{Y_2}) \quad (2)$$

μ_{Y_1} e μ_{Y_2} são os respectivos valores médios dos dados conjuntos, com N pontos para ambos.

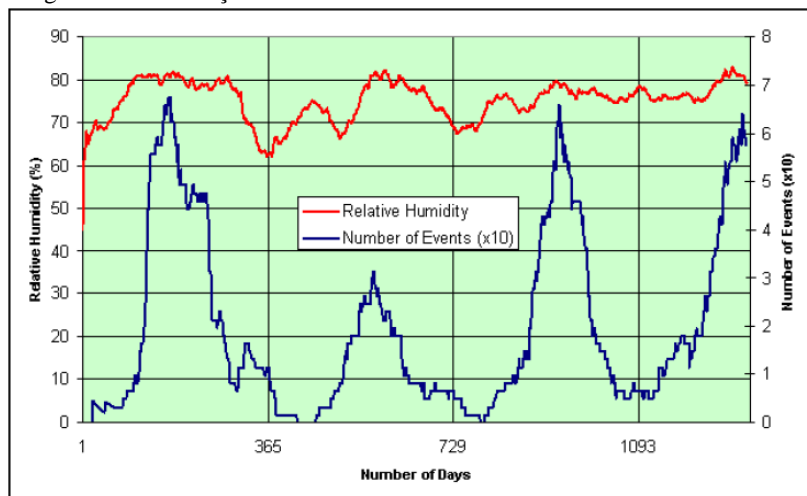
A figura 16 mostra a curva de relação entre o índice pluviométrico e o número de eventos a partir do dia 4 de janeiro 2007, até o dia 31 de julho de 2010. As figuras 17 e 18 mostram as curvas de correlação entre os desarmes da proteção e umidade relativa do ar e a velocidade do vento, respectivamente, para o mesmo período.

Figura 16 - Correlação entre o índice pluviométrico e o número de eventos.



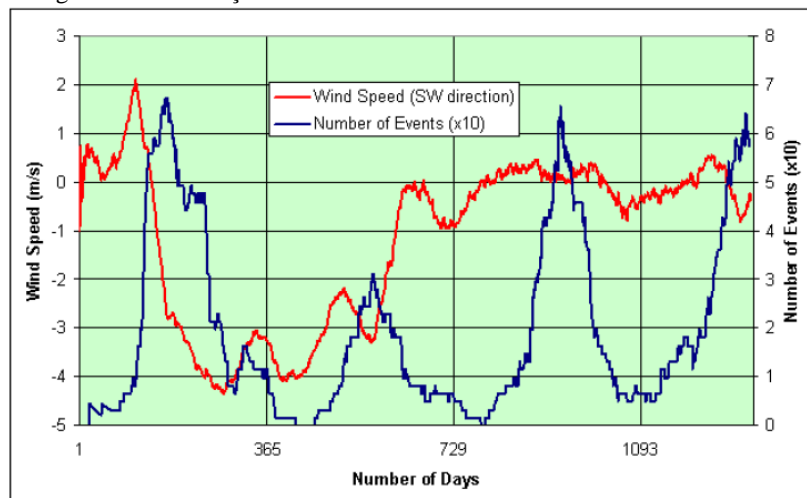
Fonte: Mustafa et al. (2012)

Figura 17 - Correlação entre a umidade relativa do ar e o número de eventos.



Fonte: Mustafa et al. (2012)

Figura 18 - Correlação entre a velocidade do vento e o número de eventos.



Fonte: Mustafa et al. (2012)

Dos gráficos mostrados nas figuras 16, 17 e 18 pode ser qualitativamente retratado o quão forte pode ser a correlação entre o número de eventos e cada um dos três parâmetros descritos. No entanto, sob um ponto de vista quantitativo, a tabela 6 mostra o fator de correlação para cada uma das comparações, que mostra a existência de uma correlação significativa entre o número de eventos e a umidade do ar e fraca correlação entre o número de eventos e o índice pluviométrico, bem como com a velocidade do vento (MUSTAFA et al, 2012).

Tabela 6 - Fatores de correlação dos eventos de desarmes de proteção.

| Correlation Factor with Protection Trips | | |
|---|-------------------|------------|
| Rainfall Index | Relative Humidity | Wind Speed |
| -0,10543 | 0,59299 | -0,08628 |

Fonte: Mustafa et al. (2012)

Valores zero e negativos do fator de correlação significam correlação fraca entre variáveis, o que é o caso para o índice pluviométrico e a velocidade do vento. O fator de correlação para o umidade relativa do ar é de cerca de 0,6, o que indica correlação significativa entre os dois eventos. Assim, de acordo com o gráfico da figura 17, esta correlação é especialmente forte durante o inverno, entre julho e agosto, o que é confirmado pelo uso das equações de correlação.

De acordo com Mustafa et al. (2012), este resultado é de alguma forma surpreendente, já que a umidade relativa do ar é geralmente e primordialmente levada em conta em estudo anterior a coordenação da isolamento, como deve ter sido feito para a linha de transmissão da UPME-CAM. Assim, entre as várias explicações a serem dadas a este resultado, as alterações climáticas surgem como uma das possibilidades, já que os parâmetros meteorológicos obtidos ao longo dos últimos anos parecem ter mudado de forma significativa, dando origem a problemas como este.

5.4 Análise dos resultados

Resultados previamente apresentados do estudo de correlação entre cada um dos três parâmetros meteorológicos analisados e o número de eventos das desarmes da proteção demonstram claramente a influência da umidade do ar.

Como o ar atmosférico fornece naturalmente o isolamento básico no projeto de linhas de transmissão, bem como em muitas instalações práticas de alta tensão, suas condições previstas pela temperatura, umidade relativa e grau de ocorrência de chuva e vento afetam sua força elétrica e, conseqüentemente, as propriedades do isolamento externo em linhas de transmissão (ZHANG, J. et al., 2008).

Dos três parâmetros escolhidos para esta presente análise, qualquer correlação significativa entre o número de faltas de energia e velocidade do vento poderia não apenas sugerir a influência de algum agente poluente do ar localizado ao longo da linha, como também poderia sugerir a ocorrência de oscilação da cadeia de isoladores, a qual reduziria a folga entre o condutor e a torre e, portanto, propiciaria falha monofásica fase-terra.

Por sua vez, correlação significativa com o índice pluviométrico obviamente sugeriria a necessidade do aprimoramento no dimensionamento da cadeia de isoladores, incluindo medidas para reduzir os seus efeitos, como aplicação de revestimento polimérico. No entanto, significativa correlação está relacionada apenas à umidade relativa do ar. Por sua vez, a avaliação da influência da umidade sobre a rigidez dielétrica do ar do isolador é uma tarefa bastante complexa, já que vários outros fatores influenciadores devem ser levados em consideração, incluindo os próprios índice pluviométrico e a velocidade do vento.

Como um exemplo, reconhecendo que a umidade muda consideravelmente ao longo do tempo e do espaço, dados mais recentes, obtidos de estudos em muitos laboratórios de alta tensão, indicaram que valores limites para impulso de comutação e tensões de descarga de corrente alternada, obtidos a uma umidade relativamente alta e assim corrigida de acordo com os procedimentos bem conhecidos, são significativamente menores do que os medidos em condições reais (ZHANG, R. e ZHENG, 1990)

Assim, tendo em conta que seria necessária uma nova e mais profunda investigação sobre a influência da umidade relativa do ar no nível de isolamento de tensão, de acordo com Mustafa et al. (2012), foi sugerido para a CEEE para fazer um novo estudo de coordenação de isolamento, levando em consideração dados reais das condições

atmosféricas ao longo do tempo e espaço em que a linha de transmissão UPME-CAM é executada, especialmente, em relação a possíveis falhas que podem estar ocorrendo em cadeias de isoladores.

Em outras palavras, a proposta está na determinação de um novo fator de correção atmosférica (ACF) para descarga de alta tensão através de lacunas de ar sob a tensão do impulso de comutação, especialmente na região perto da subestação UPME, considerada como sendo a mais crítica, pois nesta região é onde ocorre o maior número de falhas fase-terra.

Finalmente, como tarefa adicional antes da ação sugerida começar, é importante mencionar que uma câmera de monitoramento foi instalada em uma das torres da linha de transmissão com o objetivo de identificar pelo menos uma dessas falhas no isolamento. Esta câmera monitora um comprimento de cerca de 9 km da linha de transmissão, próximo à subestação da UPME. Nesse caminho, acredita-se que esteja mais próxima a identificação do problema que vem afetando esta linha de transmissão por mais de três décadas (MUSTAFA et al., 2012).

5.5 Próximos passos

Depois da análise da correlação entre os desarmes da proteção e da umidade relativa do ar, a segunda parte deste capítulo mostra o que foi implantado pela CEEE para mitigar a desconexão indesejável da linha. Propôs-se o uso de revestimento de borracha de silicone vulcanizada, RTV SR, para discos isoladores de vidro com o objetivo de reduzir a falta de homogeneidade do campo elétrico, reduzindo assim o risco de desligamentos.

Os resultados obtidos até o presente momento são positivos, já que o número de interrupções diminuiu consistentemente nas áreas onde os discos revestidos com RTV SR foram empregados. Nas próximas seções, uma análise estatística e as ações para mitigar os desarmes de proteção não planejadas são apresentadas. Finalmente, os resultados são mostrados e discutidos, levando à formação de conclusões.

5.6 Ações sugeridas para mitigar a falta de energia da linha

Segundo Mustafa et al. (2018), várias ações foram realizadas pela equipe do CEEE-GT ao longo dos últimos 40 anos para tentar resolver este problema, incluindo a substituição e aumento do número de pedaços

de várias cadeias de isoladores, bem como o redimensionamento do sistema de aterramento das estruturas. Infelizmente, nenhuma dessas ações causaram uma redução significativa no número de desarmes indesejáveis da proteção e, portanto, interrupções de energia.

Foram investigados durante a execução do projeto de pesquisa, vários dados relacionados ao comportamento desta linha de transmissão, desde aqueles de natureza elétrica, como a ocorrência de sobretensão devido à ressonância harmônica, até problemas de natureza meteorológica, para explicar as falhas de isolamento das cadeias dos isoladores na transmissão da linha UPME-CAM. São falhas com localização aleatória ao longo do comprimento da linha, que sugeriram que alguma outra preocupação deve ser considerada ao lado daquelas geralmente tomadas em qualquer estudo de coordenação de isolamento.

Tornou-se evidente que o tipo de clima encontrado na região da linha de transmissão favorece a criação de condições de alta umidade, especialmente no período de inverno, quando as interrupções se intensificam.

Conforme Mustafa et al. (2018), esse problema não é exclusivo dessa linha ou de outros casos já relatados como problemáticos pela CEEE, mas é um problema que aumenta em todo o mundo e tem recebido mais atenção de vários pesquisadores e conhecido pelo termo "*sudden flashover*". Existem teorias do modo de falha em linhas de transmissão acima de 110 kV sujeitas a alta umidade, mas ainda não existem evidências científicas. Este modo de falha difere do modo mais comum, clássico, baseado no acúmulo de contaminantes e aumento da corrente de fuga. O mecanismo de falha em questão baseia-se na distribuição não homogênea de umidade ao longo da cadeia, causando uma distribuição de impedâncias equivalentes também não homogênea e concentrando a tensão em isoladores menos úmidos. Isto é devido ao campo elétrico mais intenso na cadeia perto do condutor, salientando eletricamente seus isoladores e criando um "ponto fraco" na cadeia, onde pode ser iniciado um processo de ruptura dielétrica.

Enquanto o modo de falha não é claro, foi sugerido para a CEEE substituir isoladores de vidro por isoladores poliméricos ou isolantes de vidro com revestimento de polímero de borracha de silicone (RTV) sobre a seção crítica da linha de transmissão. A propriedade da borracha de silicone, conhecida como hidrofobicidade, interfere com o modo de falha em ambientes de alta umidade e minimiza a probabilidade de descargas de contorno.

Resultados previamente apresentados do estudo de correlação entre umidade relativa e número de eventos do desarme da proteção

demonstram claramente a influência da umidade do ar.

Como anteriormente colocado, o ar atmosférico fornece naturalmente a isolamento base no projeto de linhas de transmissão, bem como em muitas instalações práticas de alta tensão. Portanto, tomando em conta uma nova e mais profunda investigação sobre o influência da umidade relativa do ar no nível da tensão de isolamento, segundo Mustafa et al. (2018), foi sugerido à CEEE que fizesse um novo estudo de coordenação de isolamento levando em consideração dados atuais das condições atmosféricas ao longo do tempo e espaço em que a linha de transmissão UPME-CAM se envolve, especialmente em relação a possíveis falhas que podem estar ocorrendo nas cadeias dos isoladores.

Outra sugestão feita aos engenheiros de manutenção da CEEE foi a substituição de cadeias de isoladores de vidro por cadeias de isoladores de vidro cobertos com RTV em seções críticas ao longo da linha de transmissão e pré-identificadas por dispositivos de oscilografia e localização de falhas nas subestações UPME e CAM.

Em abril de 2013, a CEEE começou a mudar e fazer a instalação das cadeias de isoladores com RTV em algumas torres entre o km 16 e o km 31 da subestação UPME.

Nas regiões entre o km 21 e o km 25, cadeias completas de isoladores com RTV foram instaladas. Entre o km 16 e o km 20 e entre o km 26 e o km 31 foram utilizados apenas um isolador com RTV (no topo) da cadeia composta por 15 isoladores. As figuras 19 e 20 mostram, respectivamente, as cadeias de isoladores completos com RTV e a cadeia usando apenas um isolador com RTV (MUSTAFA et al, 2018).

Figura 19 - Corda de isoladores com RTV.



Fonte: Mustafa et al. (2018)

Figura 20 - Isolador com RTV no topo da corda.



Fonte: Mustafa et al. (2018)

5.7 Análise dos resultados pós aplicação do RTV

De acordo com Mustafa et al. (2018), a instalação das cadeias de isoladores com RTV em dez torres (entre o km 21 e o km 25), bem como a instalação de isoladores com RTV apenas no topo das cadeias em outras vinte e três torres adjacentes, conforme informado anteriormente, ocorreram entre os anos de 2013 e 2015.

Durante a instalação de isoladores com RTV, os eventos de desarmes da proteção continuaram sendo monitorados pelos engenheiros da CEEE. A tabela 7 mostra o número de desarmes da proteção em condições não tempestuosas, entre os anos 2012 e 2016. Como pode ser visto, há uma concentração de eventos nos meses de maio a julho, exatamente durante o inverno no Brasil.

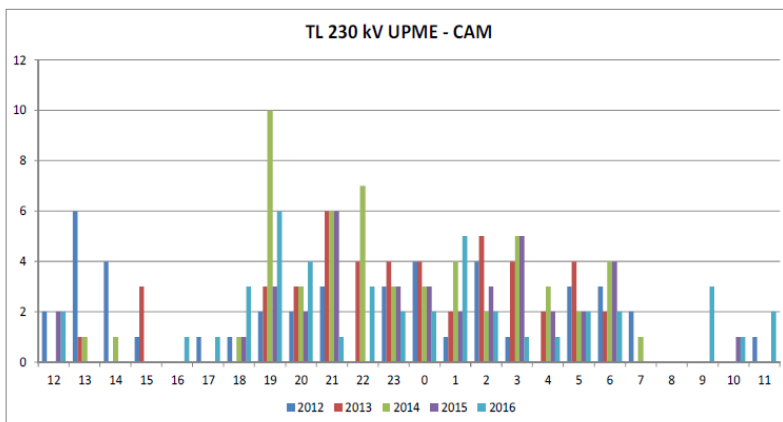
Tabela 7 - Número de desarmes da proteção entre 2012 e 2016.

| Months | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 4 | 1 | 1 | 1 | 2 | 5 |
| 5 | 8 | 5 | 9 | 5 | 5 |
| 6 | 2 | 12 | 16 | 10 | 4 |
| 7 | 11 | 10 | 15 | 11 | 14 |
| 8 | 1 | 5 | 4 | 0 | 5 |
| 9 | 2 | 1 | 1 | 3 | 2 |
| 10 | 2 | 1 | 0 | 3 | 1 |
| 11 | 0 | 3 | 5 | 1 | 0 |
| 12 | 0 | 5 | 2 | 1 | 1 |
| Total Protection Trips Under Good Weather | 31 | 47 | 56 | 39 | 43 |

Fonte: Mustafa et al. (2012)

Outra análise nos registros de eventos ocorridos na linha de transmissão UPME-CAM refere-se ao período do dia em que ocorreram os desarmes de proteção. A figura 21 mostra uma distribuição anual de eventos entre os anos de 2012 e 2016, considerando a hora do dia.

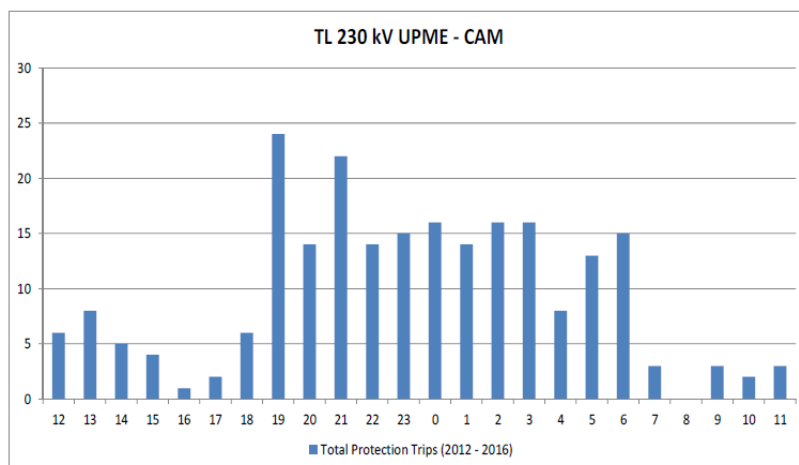
Figura 21 - Número total dos desarmes de proteção (2012 e 2016) ao longo do dia.



Fonte: Mustafa et al. (2012)

A figura 22 mostra o número total desses desarmes ao longo do dia e pode ser observado que a maioria dos desarmes de proteção, mais precisamente 82,4 % ocorreu entre 19 e 07h. O resto, 17,6% dos desarmes de proteção ocorreram entre 07h e 19h. Portanto, a maioria dos eventos ocorreu durante a noite e de manhã cedo, quando a umidade relativa é maior e a temperatura é mais baixa, especialmente entre os meses de maio e julho, como anteriormente mencionado, onde o inverno é severo no sul do Brasil.

Figura 22 - Número total dos desarmes de Proteção (2012 e 2016) ao longo do dia.



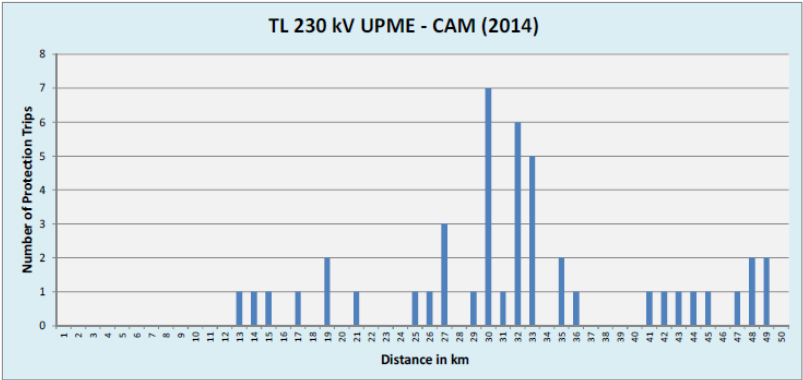
Fonte: Mustafa et al. (2012)

As figuras 23, 24 e 25 mostram o número de desarmes registrados ao longo dos 50 km de linha de transmissão da subestação UPME nos anos de 2014, 2015 e 2016, respectivamente, considerando a região crítica definida pela CEEE, conforme relatado na seção anterior.

No ano de 2014, começa a se notar alguns resultados positivos do uso de cadeias completas de isoladores com RTV entre o km 21 e o km 25. Na figura 23, segundo Mustafa et al. (2018), é possível observar que pode ter ocorrido um evento no km 21 e outro no km 25 ou em estruturas adjacentes, uma vez que o localizador de falha atualmente instalado nas subestações da CEEE não possui a precisão de um localizador de falhas por ondas viajantes. Este dispositivo está sendo comprado para instalação nos terminais das subestações da linha de transmissão UPME-CAM.

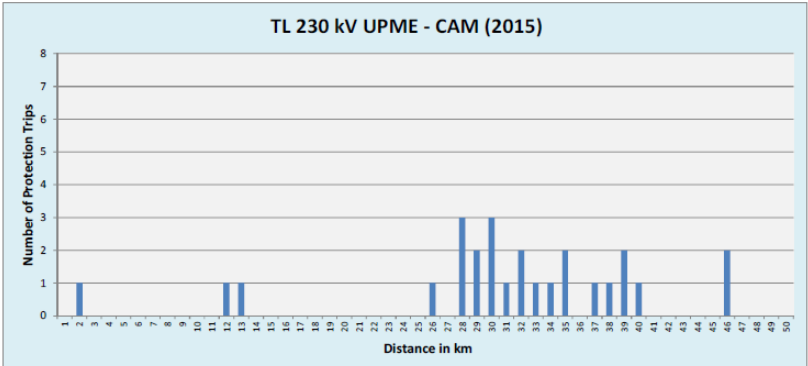
A utilização de apenas um único isolador com RTV no topo das cordas nas seções adjacentes da linha de transmissão proporcionou uma redução substancial do número de desarmes de proteção nos anos de 2015 e 2016, assim como observado nas figuras 24 e 25.

Figura 23 - Número total de desarmes de proteção em 2014 ao longo de 50 km da subestação UPME.



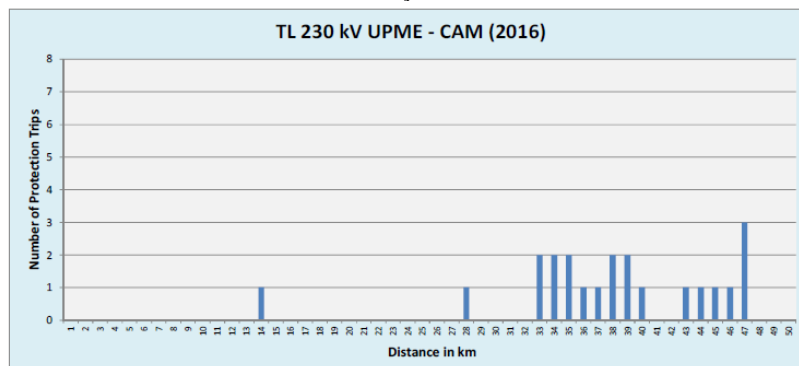
Fonte: Mustafa et al. (2012)

Figura 24 - Número total de desarmes de proteção em 2015 ao longo de 50 km da subestação UPME.



Fonte: Mustafa et al. (2012)

Figura 25 - Número total de desarmes de proteção em 2016 ao longo de 50 km da subestação UPME.



Fonte: Mustafa et al. (2012)

Como apresentado pelas figuras 23, 24 e 25, a redução do número de desarmes de 2016 em relação ao observado em 2014 caiu de 45(2014) para 22(2016), sendo uma redução de mais de 50 % do número de eventos.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

Como demonstrado pelo estudo de caso, o uso do isolante RTV em cadeias de isoladores em uma linha de transmissão de 230 kV no sul do Brasil resultou em diminuição significativa do número de desarmes de proteção não planejados desta linha de transmissão.

A umidade relativa do ar é mostrada neste trabalho como parâmetro principal a ser correlacionado com os desarmes de proteção, mas é importante estudos que analisem o desempenho dos isoladores nesta linha de transmissão em relação à contaminação que o material recebe em virtude da interação com o ambiente.

O Brasil possui mais de 90 % de seus isoladores feitos de vidro ou porcelana, o que torna inviável a substituição de todo o sistema elétrico por isoladores poliméricos, mas o RTV pode possibilitar essa transição, fornecendo características poliméricas aos isoladores tradicionais de vidro e porcelana e auxiliando na diminuição de interrupções de energia em locais com alta umidade relativa do ar.

Fica como ideia para futuros trabalhos comparar os dados de prejuízo financeiro das empresas de energia elétrica em relação aos desligamentos de energia não planejados e verificar o custo da implantação dos isolantes de RTV em toda a sua linha de transmissão para analisar se vale a pena fazer esse investimento.

Também é necessário fazer estudos sobre a toxicidade do RTV para o meio ambiente e, futuramente, fazer análises de como o material se comporta a longo prazo e os custos para manutenção e troca de isoladores.

Referências

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 1985. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma Brasileira – NBR 5422/1996**. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/327370194/NBR-5422-1985-Linhas-de-Transmissao>. Acesso em: 22 de janeiro de 2018

ABNT, 1992. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **Norma Brasileira – NBR 5460/2005**. Disponível em: <http://docslide.com.br/documents/nbr-5460-1992-sistemas-eletricos-de-potencia.html>. Acesso em: 19 de janeiro de 2018

Abradee, 2014. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – Abradee. Plataforma on-line: Setor Elétrico. **Redes de Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.abradee.com.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica>. Acesso realizado em: 26 de julho de 2015.

Aneel, 2008. Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª Edição. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap1.pdf. Acesso realizado em: 19 de janeiro de 2018.

BARRETO, A. V. **Vulnerabilidade de linhas de transmissão a desligamentos por descargas atmosféricas: uma proposta de classificação como suporte para o planejamento**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2016. p. 163 Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

CALLISTER JUNIOR, W. D. **Materials science and engineering**. 4. ed. New York: J. Wiley & Sons, 1997

CAMARGO, O. A. A. **Atlas do Potencial Eólico do Rio Grande do Sul**. Secretaria de Energia, Minas e Comunicações, Porto Alegre/RS, 2002.

CARBERRY, R.; SCHNEIDER, H. M. **Evaluation of RTV Coating for Station Insulators Subjected to Coastal Contamination.** IEEE Transactions on Power Delivery [s.l.], v. 4, n. 1, p.577-585, jan. 1989. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpas.61.19249>.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials science and engineering.** Springer, 2007.

CHANG, J. W.; GORUR, R. S. **Surface recovery of silicone rubber used for HV outdoor insulation.** Ieee Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation, [s.l.], v. 1, n. 6, p.1039-1046, 1994. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/94.368659>.

CHERNEY, E. A. **RTV silicone-a high tech solution for a dirty insulator problem.** Ieee Electrical Insulation Magazine, [s.l.], v. 11, n. 6, p.8-14, nov. 1995. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/57.475903>.

DENG, H.; HACKAM, R.; CHERNEY, E. A. **Influence of thickness, substrate type, amount of silicone fluid and solvent type on the electrical performance of RTV silicone rubber coatings.** Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 11, n. 1, p.431-443, 1996. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.484128>.

DENG, H.; HACKAM, R.; CHERNEY, E. A. **Role of the size of particles of alumina trihydrate filler on the life of RTV silicone rubber coating.** Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 10, n. 2, p.1012-1024, abr. 1995. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.400827>.

ELDRIDGE, K. et al. **Degradation of a silicone-based coating in a substation application.** Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 14, n. 1, p.188-193, 1999. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.736713>.

FUCHS, R. D., 1977. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente**. Rio de Janeiro, livros técnicos e científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.

FRONTIN, S. O., 2010. **Prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas aplicadas a linhas de transmissão**. Brasília: Goya, 2010. Disponível em: https://tlgomes.files.wordpress.com/2011/01/inovalt_web.pdf. Acesso em: 2 de fevereiro de 2018.

GARCIA, R. W. S.; SANTOS FILHO, N. **Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 1: inventário**. Décimo Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré. 2003a.

GARCIA, R. W. S.; SANTOS FILHO, N. **Isoladores de linha de transmissão do sistema elétrico brasileiro parte 2: avaliação de desempenho**. Décimo Encuentro Regional Latino Americano de la Cigré. 2003b.

GORUR, R. S. et al. **Protective coatings for improving contamination performance of outdoor high voltage ceramic insulators**. Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 10, n. 2, p.924-933, abr. 1995. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.400837>.

HALL, J.; ORBECK, T. **Evaluation of a New Protective Coating for Porcelain Insulators**. Ieee Transactions On Power Apparatus And Systems, [s.l.], v. PAS-101, n. 12, p.4689-4696, dez. 1982. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tpas.1982.317255>.

HALLIDAY, W. R. **Ótica e física moderna**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2006. v. 4.

IONE P. C.; PIAZZA F.; TOMOIOKA J. **Caracterização de isoladores poliméricos envelhecidos artificialmente**. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC). 2003. Disponível em: <http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Caracterizac%CC%A7a%CC%83o-de-Isoladores-Polime%CC%81ricos-Envelhecidos-Artificialmente.pdf>. Acesso em: 5 de fevereiro de 2018.

KIM, S. H. **Electrical Performance and Surface Analysis of RTV Silicone Rubber Coatings for H.V Outdoor Insulators**. Windsor: UWindsor, 1992. Tese de doutorado Universidade de Windsor, Windsor, Canada ,1992

KIM, S.H.; CHERNEY, E.A.; HACKAM, R. **Porcelain insulator maintenance with RTV silicone rubber coatings**. Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 6, n. 3, p.1177-1181, jul. 1991a. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.85865>.

KIM, S.H.; CHERNEY, E.A.; HACKAM, R. **The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings**. Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 5, n. 3, p.1491-1500, jul. 1990. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.57993>.

KIM, S.H.; CHERNEY, E.A.; HACKAM, R. **Suppression mechanism of leakage current on RTV coated porcelain and silicone rubber insulators**. Ieee Transactions On Power Delivery, [s.l.], v. 6, n. 4, p.1549-1556, 1991b. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/61.97691>.

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

MARAN, M. A. **Materiais elétricos: isoladores vítreos; Compêndio de trabalhos**. Foz do Iguaçu; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

MILES, J.; SHEVLIN, M. **Applying regression and correlation: A guide for students and researchers**. Thousand Oaks, California, Sage Publications, 2001.

MUSTAFA, T. I. A. H.; MEYER, L. H.; CABRAL, S. H. L.; ALMAGUER, H. A. D.; PUCHALE, L. H. B. **An analysis of correlation between meteorological conditions and the protection trips in a 230 kV transmission line**. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, 2012.

MUSTAFA, T. I. A. H.; MEYER, L. H.; CABRAL, S. H. L.; ALMAGUER, H. A. D.; PUCHALE, L. H. B. **The Experience with the Use of RTV to Mitigate Line Outages in Southern Brazil**. Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2018.

ONS, 2015. Operador Nacional do Sistema – ONS. **Procedimentos de Rede. Submódulo 20.1 – Glossário de Termos Técnicos**. Disponível em:

http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2020%2FSubm%C3%B3dulo%2020.1%2FSubm%C3%B3dulo%2020.1_Rev_1.0.pdf. Acesso em: 2 de fevereiro de 2018.

PROTZEK, B. R. **Materiais elétricos: isoladores poliméricos; Compêndio de trabalhos**. Foz do Iguaçu; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

ROSA JUNIOR, A. L. R. da. **Materiais elétricos: isoladores cerâmicos; Compêndio de trabalhos**. Foz do Iguaçu; Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

SANTANA ISOLADORES S.A. **Catalogo 3: Isoladores de suspensão e descarregadores de chifres**. Pedreira/SP, 2009. 23 p.

STEVENSON, W. D. **Elementos de Análise de Sistemas de Potência**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 452 p

TRAVERSA, S. S. **Isolantes**. 2009 Disponível em: <https://docplayer.com.br/60768241-Isolantes-disciplina-materiais-eletricos-prof-a-sheila-santisi-travessa.html>. Acesso em: 4 de fevereiro de 2018.

VAN VLACK, L. H. **Elements of materials science and engineering**. 4. ed. Addison-Wesley, 1980.

VEDISHCHEVA, N.; WRIGHT, A. C. **Chemical Structure of Oxide Glasses: A Concept for Establishing Structure–Property Relationships**. 2009

ZHANG, J.; PETRACHE, E.; CHISHOLM, W. A.; TAUCH, N.; FRIESEN, D. **Application of Hourly Meteorological Records to Atmospheric Correction Factors in Insulation Coordination under Switching Impulse Voltage**. 2008 International Conference On High Voltage Engineering And Application, [s.l.], nov. 2008. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ichve.2008.4773860>.

ZHANG, R.; ZHENG, J. **Progress in outdoor insulation research in China**. **Ieee Transactions On Electrical Insulation**, [s.l.], v. 25, n. 6, p.1125-1137, 1990. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/14.64499>.
